

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

**PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI
STALOWYCH WEDŁUG PN-EN 1993-1-1**

ANTONI BIEGUS

tel. 071 372 77 79, 071 32037 66, 0664 531 931
antoni.biegus@pwr.wroc.pl

Program 10 Eurokodów (57 części – EN 199X-X-X)

EN 1990	Podstawy projektowania konstrukcji
EN 1991	Oddziaływania na konstrukcje
EN 1992	Projektowanie konstrukcji z betonu
EN 1993	Projektowanie konstrukcji stalowych
EN 1994	Projektowanie konstrukcji zespolonych...
EN 1995	Projektowanie konstrukcji drewnianych
EN 1996	Projektowanie konstrukcji murowych
EN 1997	Projektowanie geotechniczne
EN 1998	Projektowanie sejsmiczne
EN 1999	Projektowanie konstrukcji aluminiowych

Eurokod 3:

Projektowanie konstrukcji stalowych

Składa się z następujących części

EN 1993-1^{*/}: Reguły ogólne i reguły dla budynków

EN 1993-2: Mosty stalowe

EN 1993-3^{*/}: Wieże, maszty i kominy

EN 1993-4^{*/}: Silosy, zbiorniki i rurociągi

EN 1993-5: Palowanie i grodzie

EN 1993-6: Konstrukcje wsporcze suwnic

^{*/} Normy wieloczęściowe

Część Eurokodu 3 (1993-1-X): Projektowanie konstrukcji stalowych

Obejmuje następujące podczęści:

1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków

1-2: Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe

1-3: Konstrukcje z kształtowników i blach profilow. na zimno

1-4: Konstrukcje ze stali nierdzewnych

1-5: Blachownice

1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych

1-7: Konstrukcje płytowe

1-8: Projektowanie węzłów

1-9: Zmęczenie

1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągłość międzywarstwową

1-11: Konstrukcje ciągnowe

1-12: Konstrukcje ze stali S 500÷S 700

PN-EN 1993-1-1 podaje podstawowe reguły projektowania konstrukcji stalowych z materiałów o grubości $t \geq 3 \text{ mm}$, a także postanowienia dodatkowe dotyczące projektowania **budynków** o konstrukcji stalowej.

Dokumenty związane z Eurokodem 3

- EN 1990: Podstawy projektowania konstrukcji
- EN 1991: Oddziaływania na konstrukcje
- EN 1090: Wykonanie konstrukcji stalowych
- wymagania techniczne
- Europejskie normy (EN) i aprobaty techniczne (ETA) dotyczące wyrobów budowlanych na konstrukcje stalowe (np. Normy wyrobów ze stali konstrukcyjnej spawalnej EN 10025-1:2004, EN 10025-**2**:2004,

1.3. ZAŁOŻENIA

Założenia ogólne wymienione w PN-EN 1990 oraz wytwarzanie i montaż w EN 1090

1.4. ROZRÓŻNIENIE ZASAD I REGUŁ STOSOWANIA

Wymienione w PN-EN 1990 – rozdz. 1.4.

1.5. TERMINY I DEFINICJE

Terminy wymienione w PN-EN 1990 – rozdz. 1.5.

Ponadto w PN-EN 1993-1-1 podano **dodatkowe** podstawowe terminy i definicje związane z projektowaniem **budynków** o konstrukcji stalowej.

Analiza globalna – wyznaczenie spójnego zbioru sił wewnętrznych i momentów zginających (N , V , M) w konstrukcji, które są w równowadze z określonym zbiorem oddziaływań zewnętrznych.

Długość teoretyczna – długość między sąsiednimi punktami bocznego podparcia, lub punktem podparcia i jego końcem (np. wspornik) w rozpatrywanej płaszczyźnie wyboczenia.

Długość wyboczeniowa – długość teoretyczna elementu podpartego przegubowo (analogicznego pod każdym względem), który ma taką samą, jak rozpatrywany element, nośność krytyczną przy wyboczeniu.

Efekt szerokiego pasa – nierównomierny rozkład naprężeń normalnych uwzględnia się stosując tzw. *szerokość współpracującą*.

Ustrój prętowy (szkieletowy) - konstrukcja lub jej część, złożona z bezpośrednio połączonych elementów prętowych, zaprojektowana do przenoszenia obciążeń.

Termin ten odnosi się zarówno do ustrojów ramowych, jak i kratowych. Obejmuje zarówno ustroje płaskie jak i trójwymiarowe.

Typ szkieletu, w aspekcie analizy globalnej obejmuje następujące kategorie układów:

- układy **ciągłe** – o węzłach sztywnych,
- układy **niepełnociągłe** – o węzłach podatnych (w analizie należy uwzględnić zarówno właściwości elementów oraz węzłów),
- układy **proste** – o węzłach przegubowych.

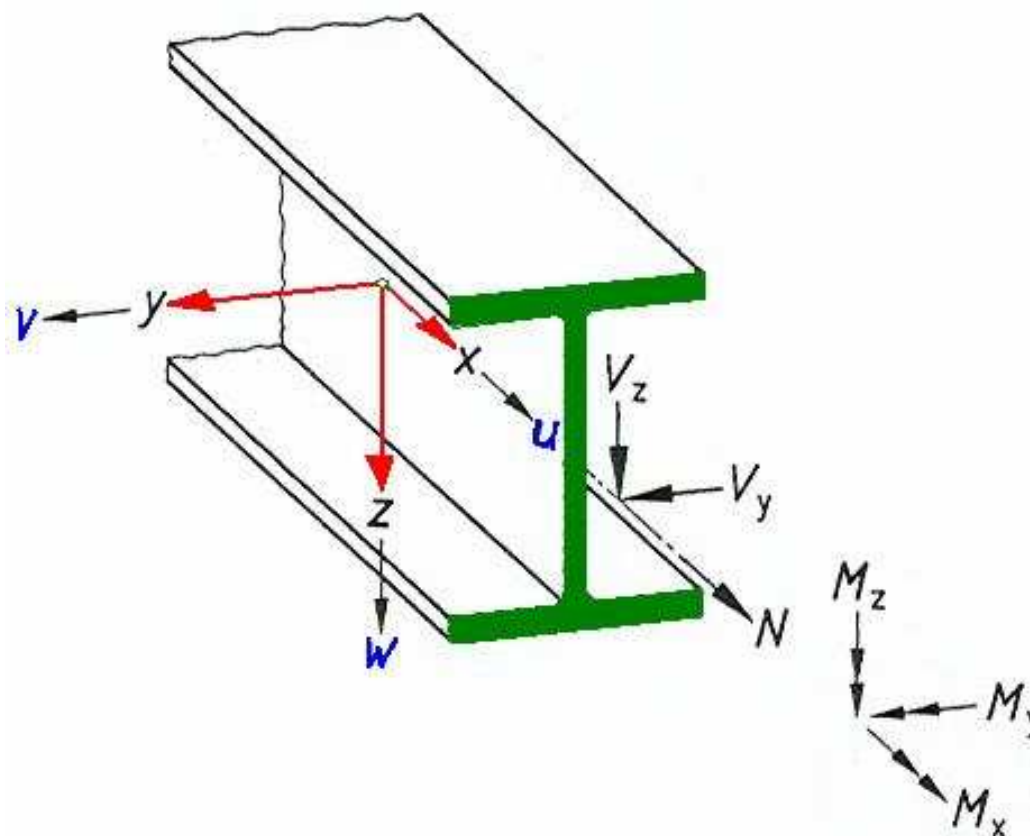
Oznaczenia (najistotniejsze różnice)

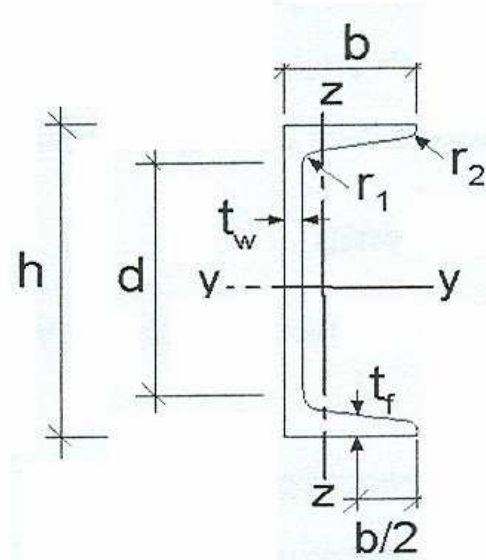
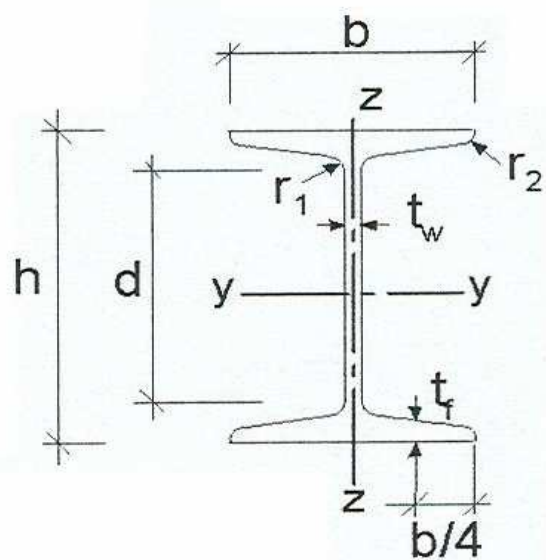
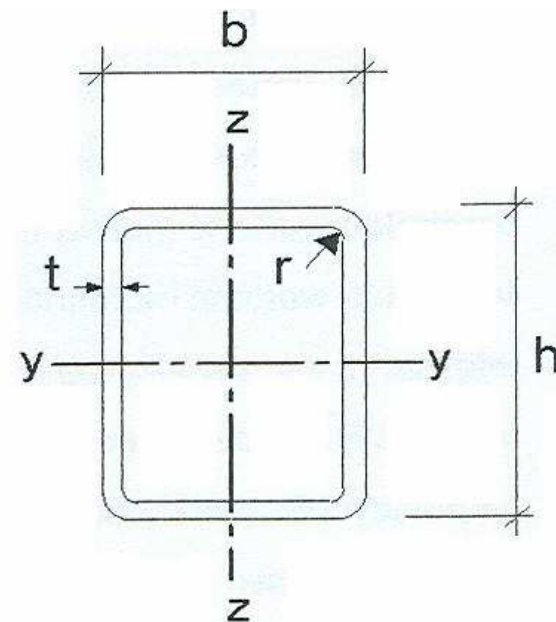
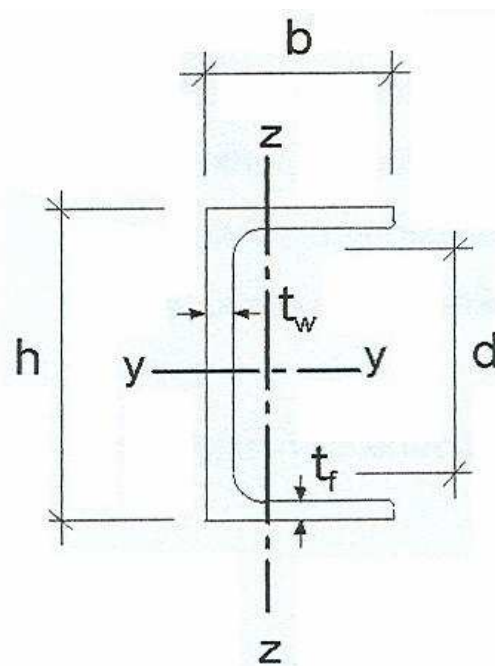
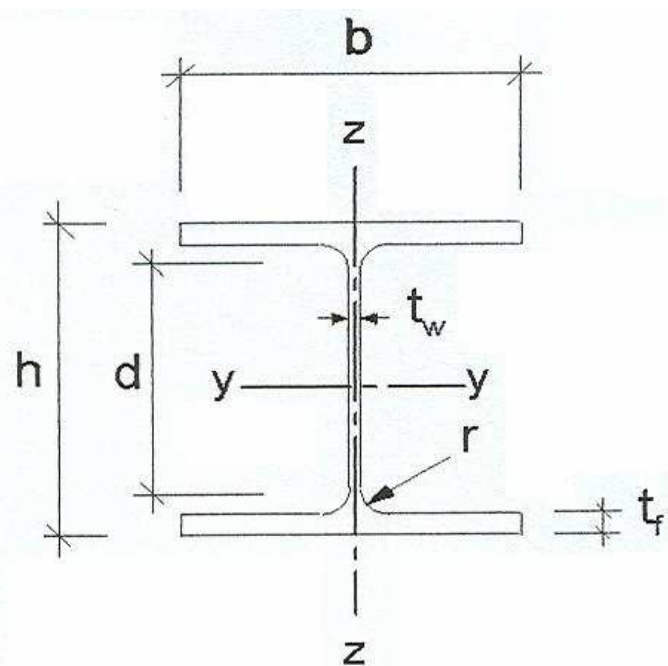
W Eurokodzie 3 występuje wiele nowych oznaczeń.

Najważniejsze systemowe różnice, jakie warto odnotować w kontekście PN są następujące

SYMBOLE

- Główne osie przekroju poprzecznego
y-y – oś największej bezwładności,
z-z – oś najmniejszej bezwładności,
- x-x – oś podłużna elementu





- **Wartości obliczeniowe** - schemat zapisu

X - efekt oddziaływań (np. $X = N, V, M, \dots$),

X_{Ed} - obliczeniowy efekt oddziaływań
(np. $N_{Ed}, V_{Ed}, M_{Ed}, \dots$),

X_{Rd} - nośność obliczeniowa - stowarzyszona z X
(np. $N_{t,Rd}, N_{c,Rd}, N_{b,Rd}, V_{c,Rd}, T_{Rd}, M_{c,Rd}, \dots$)

Według PN-90/B-03200

- obliczeniowy efekt oddziaływań ($N, V, M, \dots$),

- nośność obliczeniowa - stowarzyszona z X
(N_{Rc}, V_R, M_R)

- **Współczynniki niestateczności (redukcyjne)**

χ - ze względu na wyboczenie,

χ_{LT} - ze względu na zwichrzenie

Według PN-90/B-03200

φ, φ_L

Material - stal konstrukcyjna

Stal stosowana na konstrukcje powinna być **ciągliwa, spawalna i odporna na kruche pękanie**.

Jako wartości charakterystyczne granicy plastyczności (f_y) przyjmuje się specyfikowane w normach wyrobów wartości nominalne ($f_y = R_{eH}$, $f_u = R_m$). { R_{eH} , R_m wg normy wyrobu}

- Zalecane warunki ciągliwości:

$$f_u/f_y \geq 1,10, \quad A_5 \geq 15\%, \quad \varepsilon_u \geq 15 \varepsilon_y \quad (\varepsilon_y = f_y / E)$$

Powyższe warunki spełniają w szczególności stale

S 235, S 275, S 355, S 420 oraz S 460

W normie EN 1993-1-1 powołano się na normy:

EN 10025: Wyroby walcowane na gorąco

EN 10210: Kształtowniki rurowe wykończone na gorąco

EN 10219: Kształtowniki rurowe profilowane na zimno

- Zalecenia dot. **odporność na kruche pękanie**: EN 1993-1-10

Materiał - stal konstrukcyjna – c.d.

Według PN-90/B-03200 jako charakterystykę wytrzymałościową materiału przyjmuje się parametr w postaci **wytrzymałości obliczeniowej stali**

$$f_d = f_y / \gamma_s$$

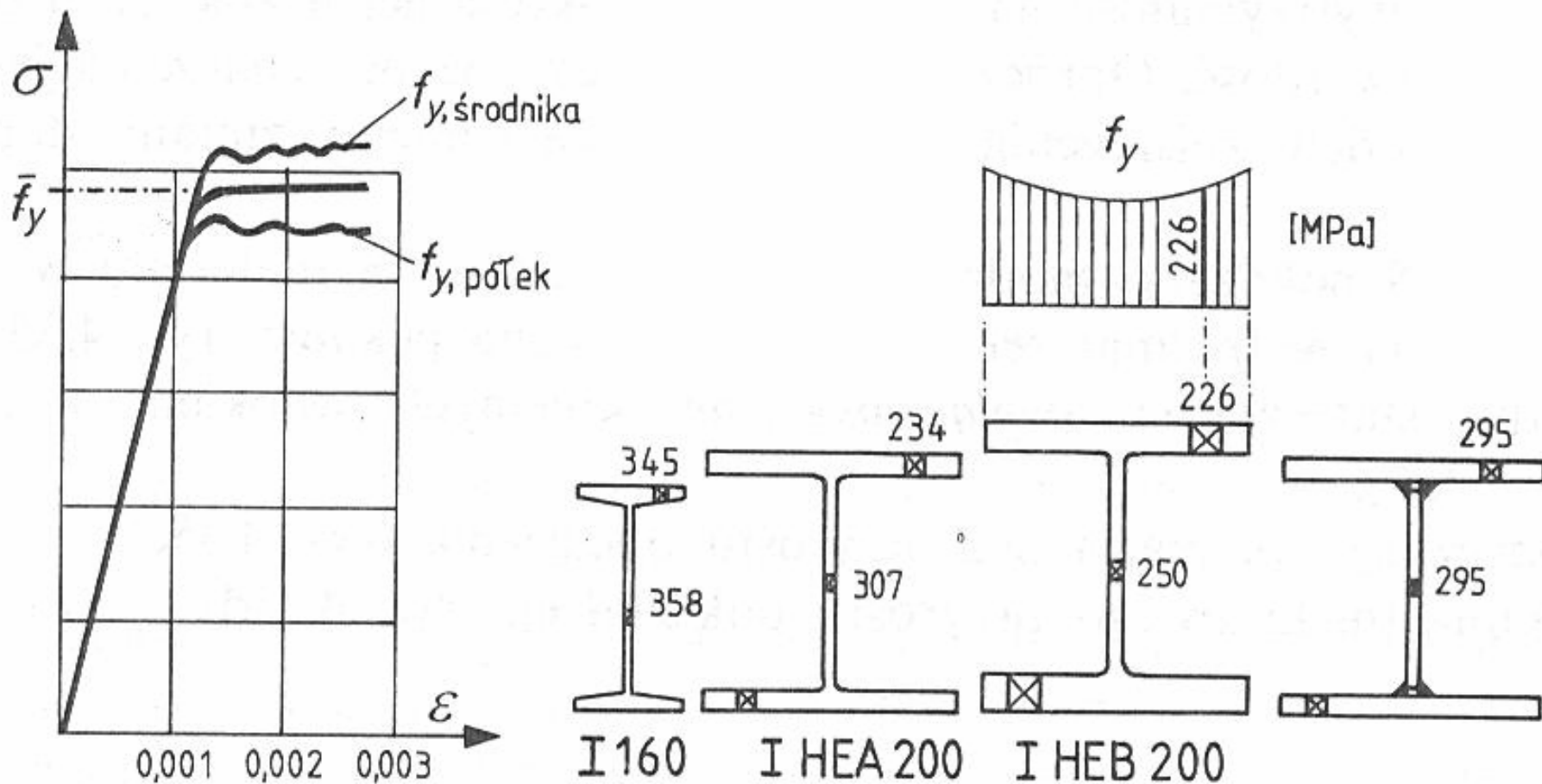
Współczynnik materiałowy γ_s nie występuje w PN-90/B-03200 w sposób „jawny”, gdyż ustalając nośność korzysta się z wartości **wytrzymałości obliczeniowej stali f_d** .

W Eurokodzie w celu określenia nośności korzysta się z wartości **granicy plastyczności stali f_y** , którą w zależności analizowanego stanu wyężenia dzieli się przez odpowiedni, „jawnie” występujący, współczynnik materiałowy: γ_M (γ_{M0} , γ_{M1} , γ_{M2}).

Moduł sprężystości

$E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ - wg Eurokodu 3

$E = 205\,000\text{ N/mm}^2$ - wg PN-90/B-03200



Różnicowanie f_y w zależności od grubości. Przedziały:

$t \leq 40$ mm i $40 < t \leq 80$ mm - według **EC 1993-1-1**

$t \leq 16$ mm, $16 < t \leq 40$ mm i $40 < t \leq 100$ mm - wg **PN-90/B-03200**

**Nominalne wartości granicy plastyczności f_y i
wytrzymałości na rozciąganie f_u stali walcowanej na gorąco**

Norma i gatunek stali	Nominalna grubość elementu t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

**STALE
DROBNOZIARNISTE**

**N – normalizowane
lub walcowane
normalizująco**

**M – walcowanych
termomechanicznie**

L – niska temperatura

CIĄGLIWOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWA

- zdolność do odkształceń plastycznych na wskroś grubości materiału (np. w spawanych połączeniach belek ze słupami)

Wytyczne doboru parametrów ciągłości podano EN 1993-1-10.

Wartość Z_{Ed} ustala się według 1993-1-10/3.2(2) zgodnie do klas jakości według EN 10163 – w przypadku budynków przyporządkowanie podano w tablicy 3.2.

Tablica 3.2: Dobór klasy jakości wg EN 10164	
Wymagany wskaźnik Z_{Ed} obliczony wg EN 1993-1-10	Klasa jakości ze względu na Z_{Rd} wg EN 10164
$Z_{Ed} \leq 10$	–
$10 < Z_{Ed} \leq 20$	Z 15
$20 < Z_{Ed} \leq 30$	Z 25
$Z_{Ed} > 30$	Z 35

355 – granica plastyczności [N/mm²]
dla grubości < 16 mm

S 355 J2 + M

Stale stopowe drobnoziarniste

N – normalizowana lub walcowana
normalizująco

M – walcowana termomechanicznie

Q – hartowana i odpuszczana

A – utwardzana wydzieleniowo

S – stal konstrukcyjna

Warianty stali:

- niestopowe
(podstawowa S 235)
- stopowe drobnoziarniste
(jakościowe S 275, S 355)
(specjalne S 460)

J2 – symbol określający pracę łamania
Warianty

stale stopowe (JR – ud. 27 J przy + 20°C)

(J0 – ud. 27 J przy + 0°C)

(J2 – ud. 27 J przy – 20°C)

stale stopowe drobnoziarniste

(N – ud. 40 J przy – 20°C)

(NL – ud. 27 J przy -50°C)

Pierwszy symbol główny – określa zastosowanie (np. S - stal konstrukcyjna, H - stal na kształtowniki zamknięte, B - stal na pręty zbrojeniowe do betonu, G - staliwo).

Drugi symbol główny – to trzycyfrowa liczba określająca min. granicę plastyczności.

Symbole dodatkowe – np. pierwszy symbol dodatkowy to odmiana plastyczności wyrażona w pracy łamania KV w żądanej temper. Np. KV = 27 J w temperaturze + 20 °C.

ZAGADNIENIA MATERIAŁOWE

Grupa stali		niestopowe				mikroskopowe (drobnoziarniste)			
Klasa jakości	Kategoria wytrzymałościowa	JR	J0	J2	K2	M	N	ML	NL
		KV = 27 J w temperaturze [°C]							
		+20	0	-20	-30	-30	-30	-50	-50
	S235	+	+	+					
	S275	+	+	+		+	+	+	+
	S355	+	+	+	+	+	+	+	+
	S420					+	+	+	+
	S460					+	+	+	+

Stale trudno rdzewiejące – stale stopowe, ale nie drobnoziarniste (z podwyższoną zawartością fosforu) z dodatk. symbolem W lub WP
np. S 235 J0 W, S 235 J2 W, S 355 J0 WP, S 355 J2 WP

Przykładowe oznaczenia gatunków stali konstrukcyjnych

Znak zgodnie z [10]	Objaśnienie znaku
S185	Stal konstrukcyjna o $f_y = 185$ MPa
S335	Stal konstrukcyjna o $f_y = 335$ MPa
S355JR	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa i udarności 27J w temp. $+20$ °C
S355J0	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa i udarności 27J w temp. 0 °C
S355J2Gm ¹⁾	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa i udarności 27J w temp. -20 °C oraz o określonych warunkach dostawy
S355K2Gm ¹⁾	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa i udarności 40J w temp. -20 °C oraz o określonych warunkach dostawy
S355K2GmC ¹⁾	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa i udarności 40J w temp. -20 °C, o określonych warunkach dostawy, do formowania na zimno
S355N	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa, normalizowana lub walcowana normalizująco
S355MC	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa, walcowana termomechanicznie, do formowania na zimno
S355NC	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa, normalizowana lub walcowana normalizująco, do formowania na zimno
S460Q	Stal konstrukcyjna o $f_y = 460$ MPa, ulepszana cieplnie
S235J0W1	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa i udarności 27J w temp. 0 °C, odporna na korozję atmosferyczną, gatunek 1
S235J2W2	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa i udarności 27J w temp. -20 °C, odporna na korozję atmosferyczną, gatunek 2
S355GmD	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa o innych wymaganych właściwościach, do powlekania na gorąco
S355GmD+Z	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa o innych wymaganych właściwościach, do powlekania na gorąco, z warstwą ochronną cynku
S355GmS	Stal konstrukcyjna o $f_y = 355$ MPa o innych wymaganych właściwościach, do budowy statków

¹⁾ m = cyfra oznaczająca warunki dostawy, np. jakość powierzchni, sposób znakowania, wymiary.

TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI

W projektowaniu konstrukcji należy brać pod uwagę następujące procesy deterioracji (pogaszenia się ich właściwości fizycznych):

- korozję - skutek oddziaływań (wpływów) środowiska
- zużycie części- skutek oddziaływań mechanicznych
- zmęczenie materiału (rozwój mikropęknięć) – skutek oddziaływań wysokocyklonowych ($N > 10^4$).

Nośność zmęczeniową konstrukcji sprawdza się według EN-1993-1-9.

Trwałość konstrukcji zapewnia się przez odpowiednie jej: **zaprojektowanie i wykonanie** (zabezpieczenie), oraz **właściwe utrzymanie** w projektowym okresie użytkowania.

MODELE ANALIZY KONSTRUKCJI

W analizie wyteżenia konstrukcji wyróżnia się **elementy krytyczne**. Są to takie części składowe ustroju, w których w skutek przyrostu obciążenia dochodzi do wyczerpania ich nośności, prowadzącego do zmiany konstrukcji w ustrój geometrycznie zmienny.

Mogą nimi być przekroje elementów, pręty (rygle, podciąg, słupy) oraz węzły (połączenia, styki).

Elementy krytyczne są przedmiotem wymiarowania i normowego sprawdzania ich bezpieczeństwa.

Charakteryzowane są one parametrami ich nośności, czyli zdolnością do przenoszenia określonych sił wewnętrznych.

Bezpieczeństwo konstrukcji (w odniesieniu do spełnienia warunku wytrzymałościowego) w ujęciu normy sprowadza się do kontroli stopnia wykorzystania nośności elementów krytycznych w stosunku do prognozowanych sił wewnętrznych, które mogą w nich wystąpić.

Sprawdzeniu wytrzymałościowemu podlegają elementy krytyczne, w których można spodziewać się lokalnych ekstremalnych sił wewnętrznych.

Analiza nośności granicznej konstrukcji jest uwarunkowana znajomością jej ścieżki równowagi statycznej i ekstremalnych sił przekrojowych oraz nośności granicznej elementów krytycznych ustroju.

Przystępując do oceny bezpieczeństwa konstrukcji należy dokonać wyboru jej modelu obliczeniowego i metody analizy.

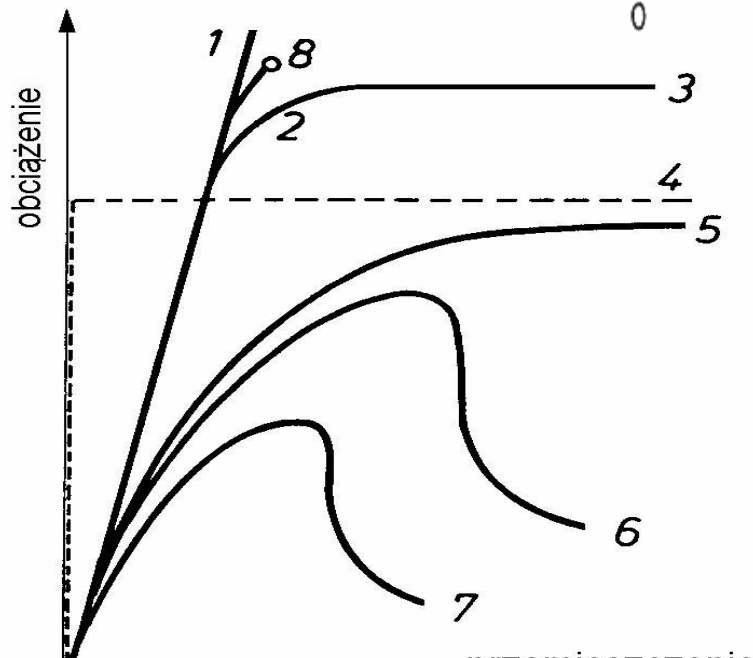
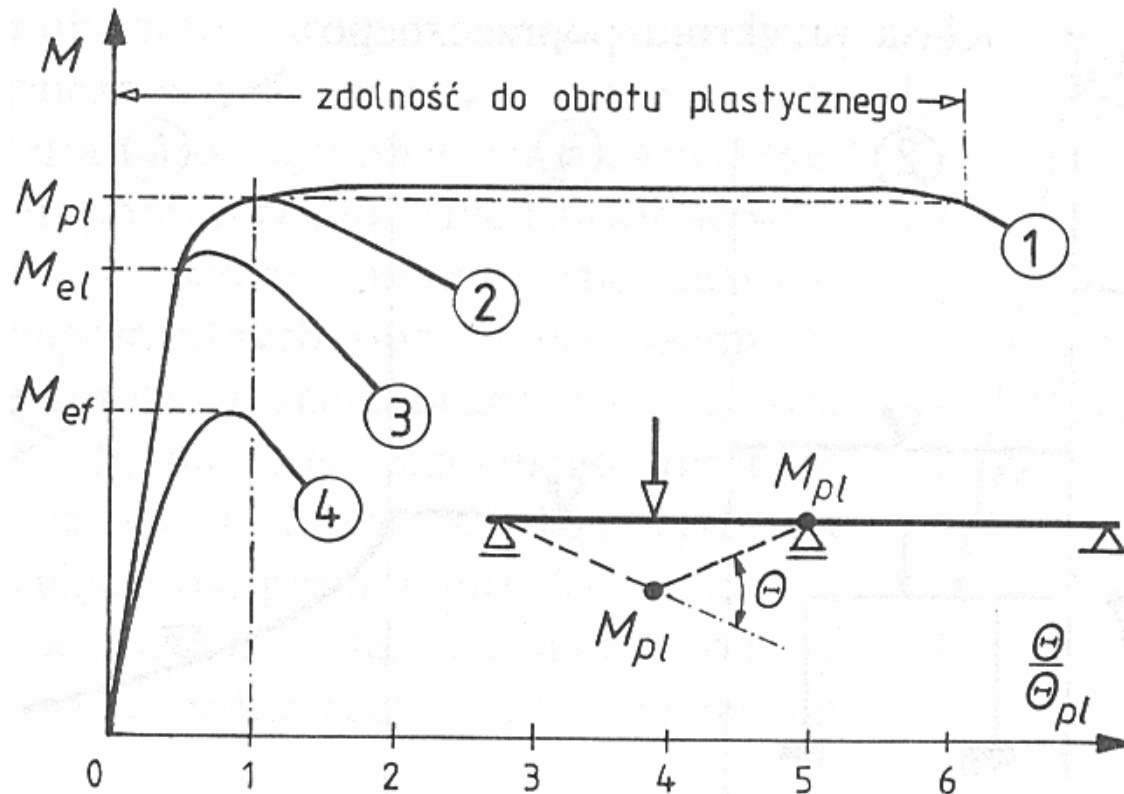
Powinny one, w sposób możliwie precyzyjny, odwzorowywać rzeczywiste zachowanie się konstrukcji. Dotyczy to zarówno przyjęcia schematu statycznego i obciążeń ustroju, jak i modelu zachowania się konstrukcji, prętów, podpór i węzłów pod obciążeniem.

Należy dokonać identyfikacji modeli ścieżek równowagi statycznej przekrojów, prętów i konstrukcji

Znajomość tych modeli odgrywa podstawową rolę przy wyborze właściwego modelu i metody obliczeń statycznych konstrukcji.

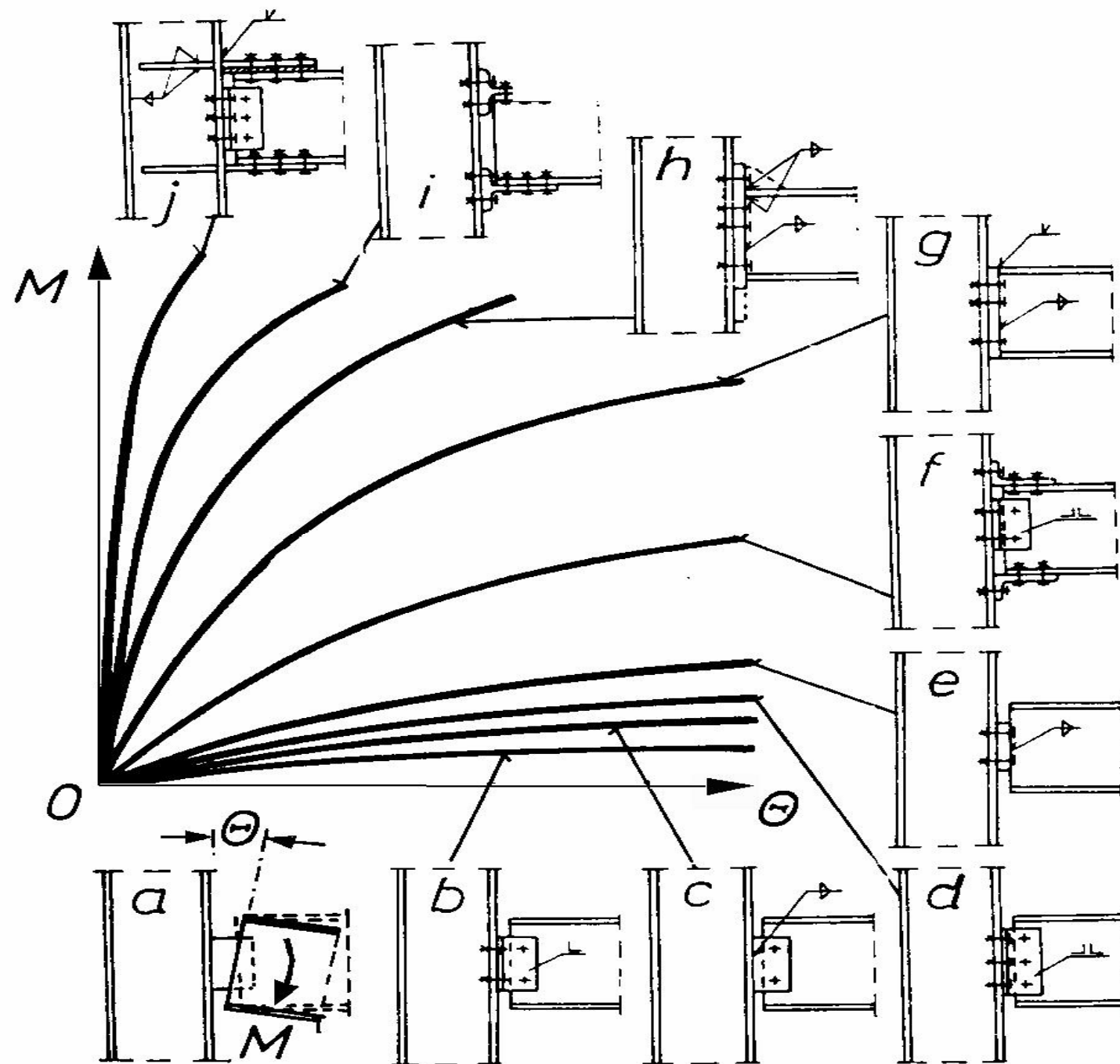
Współczesne techniki wspomaganego komputerowo projektowania konstrukcji, umożliwiającą dokładniejszą niż dawniej analizę wytrzymałości i odkształcenia konstrukcji różnych typów i ocenę ich nośności.

Nośność graniczna przekrojów prętów



Nośność graniczna prętów

Nośność graniczna węzłów



ANALIZA KONSTRUKCJI

W analizie konstrukcji należy przyjmować odpowiednie założenia i modele obliczeniowe, odzwierciedlające zachowanie się konstrukcji w rozpatrywanym stanie granicznym.

Stosowane rodzaje analizy globalnej

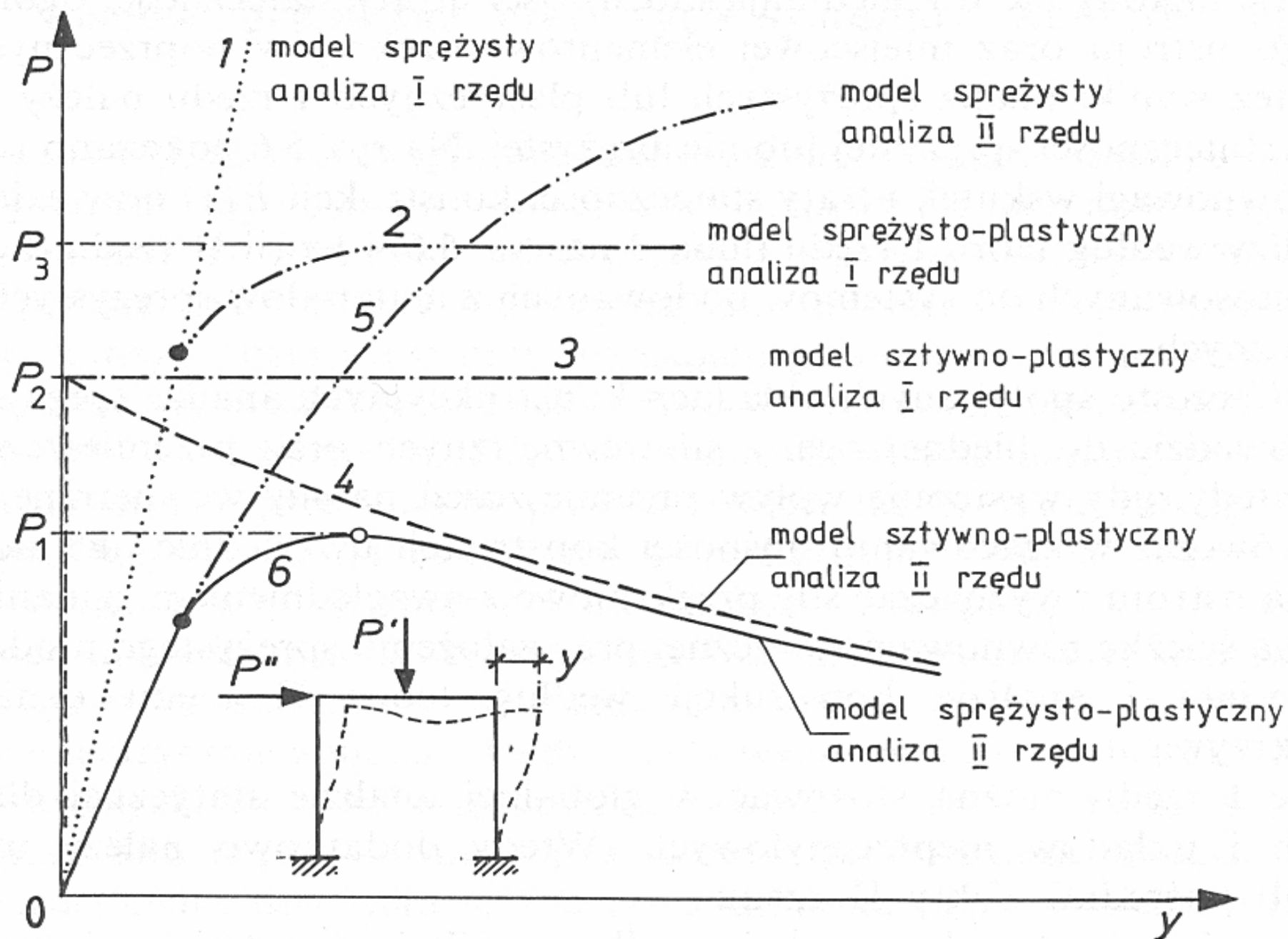
- ◆ w aspekcie geometrii i równań statyki
 - **analiza I rzędu** (geometria początkowa)
 - **analiza II rzędu** (geometria zdeformowana)
- ◆ w aspekcie właściwości materiału
 - **analiza liniowo-sprężysta**
 - **analiza nieliniowa** (sprężysto-plastyczna)

RODZAJE ANALIZY USTROJÓW PRĘTOWYCH

analiza liniowo-sprężysta I rzędu bez redystrybucji

(założenia: liniowy związek naprężenie-odkształcenie i początkowa geometria konstrukcji)

- analiza liniowo-sprężysta I rzędu z uwzględnieniem redystrybucji (bez analizy zdolności do obrotu)
- analiza liniowo-sprężysta II rzędu
(założenia: liniowy związek naprężenie-odkształcenie i odkształcona geometria konstrukcji)
- analiza nieliniowa II rzędu (założenia: nieliniowy związek naprężenie-odkształcenie i odkształcona geometria ustroju) - może być albo:
 - ◆ analiza sprężysto-idealnie plastyczna albo
 - ◆ analiza sprężysto-plastyczna
- analiza sprężysto-idealnie plastyczna I rzędu
(założenia: część liniowa sprężysta przechodząca w plastyczną bez wzmocnienia)
- analiza sprężysto-idealnie plastyczna II rzędu
- analiza sprężysto-idealnie plastyczna I lub II rzędu
- analiza sztywno-plastyczna II rzędu
(analiza ustroju nieodkształconego)

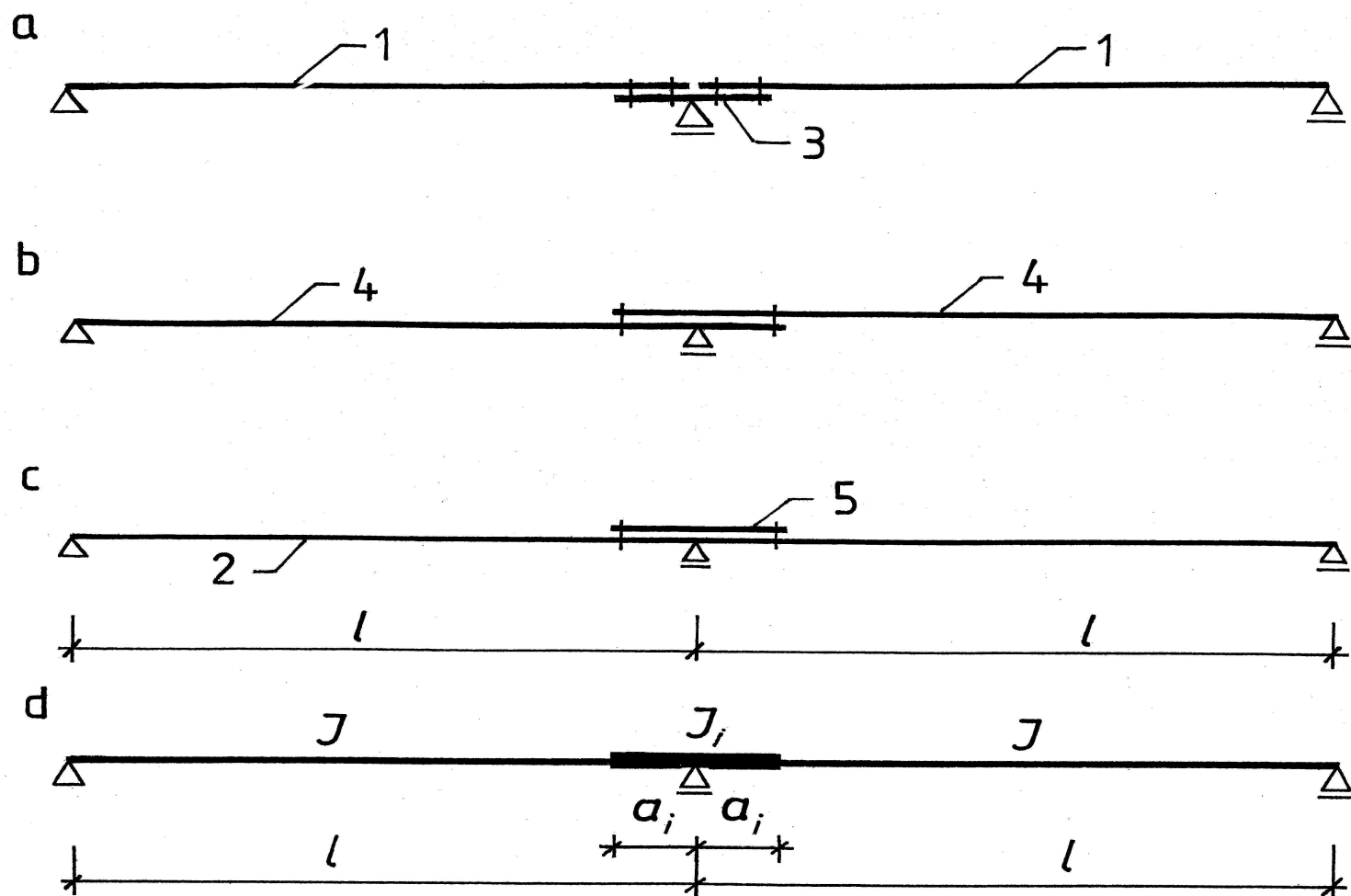
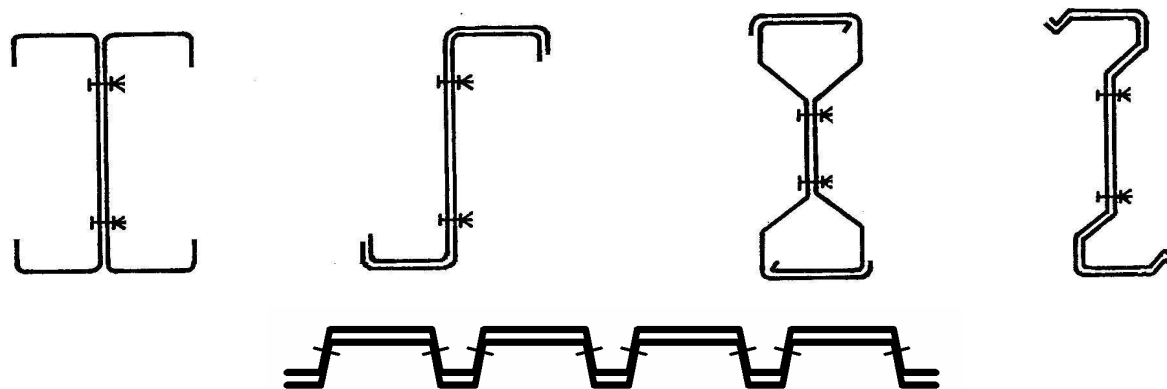


MODELOWANIE WĘZŁÓW

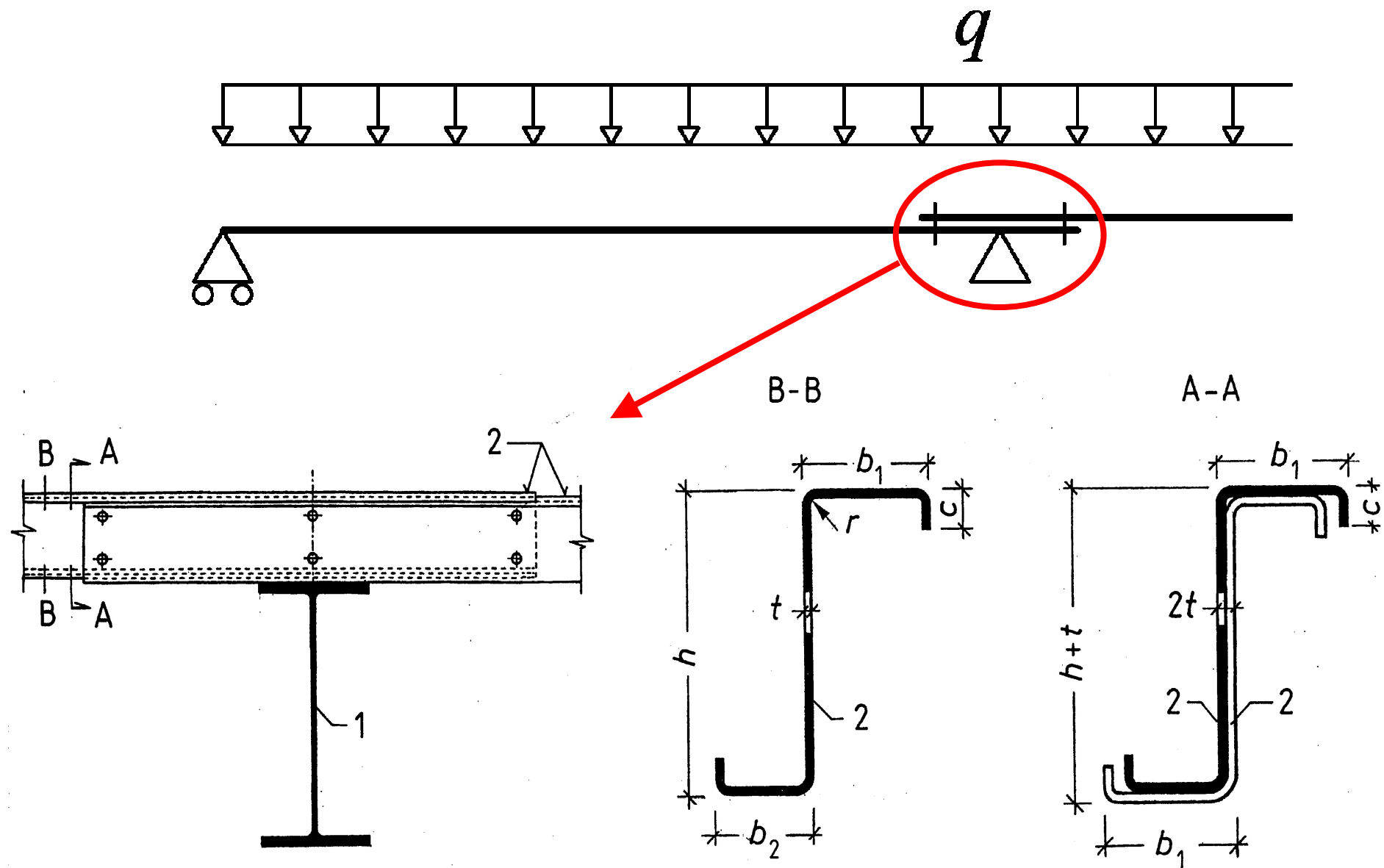
Dla potrzeb analizy, ze względu na modele połączeń i ich klasy w aspekcie zginania rozróżnia się (EN 1993-1-8/5.1.1) modele węzłów:

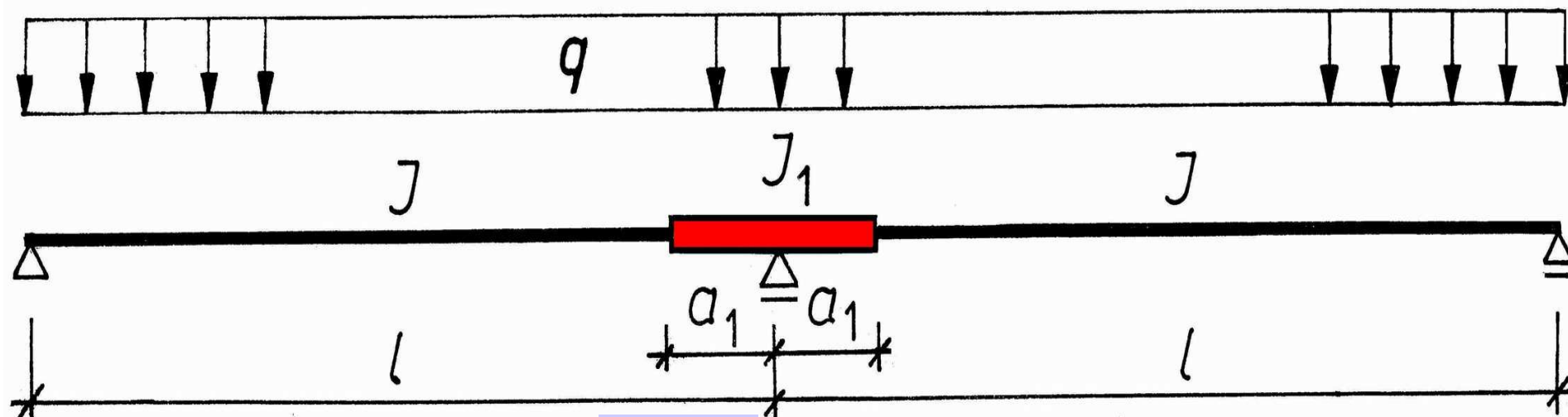
- układy **ciągłe** – o węzłach sztywnych,
- układy **niepełnociągłe** – o węzłach **podatnych**
(w analizie należy uwzględnić zarówno właściwości elementów oraz węzłów),
- układy **proste** - o węzłach nominalnie przegubowych

Wpływ zachowania się węzłów na rozkład sił wewnętrznych i deformacji konstrukcji **zazwyczaj może być pominięty**, lecz jeśli wpływ ten jest istotny (jak w ustrojach z węzłami podatnymi), to powinien być uwzględniony.



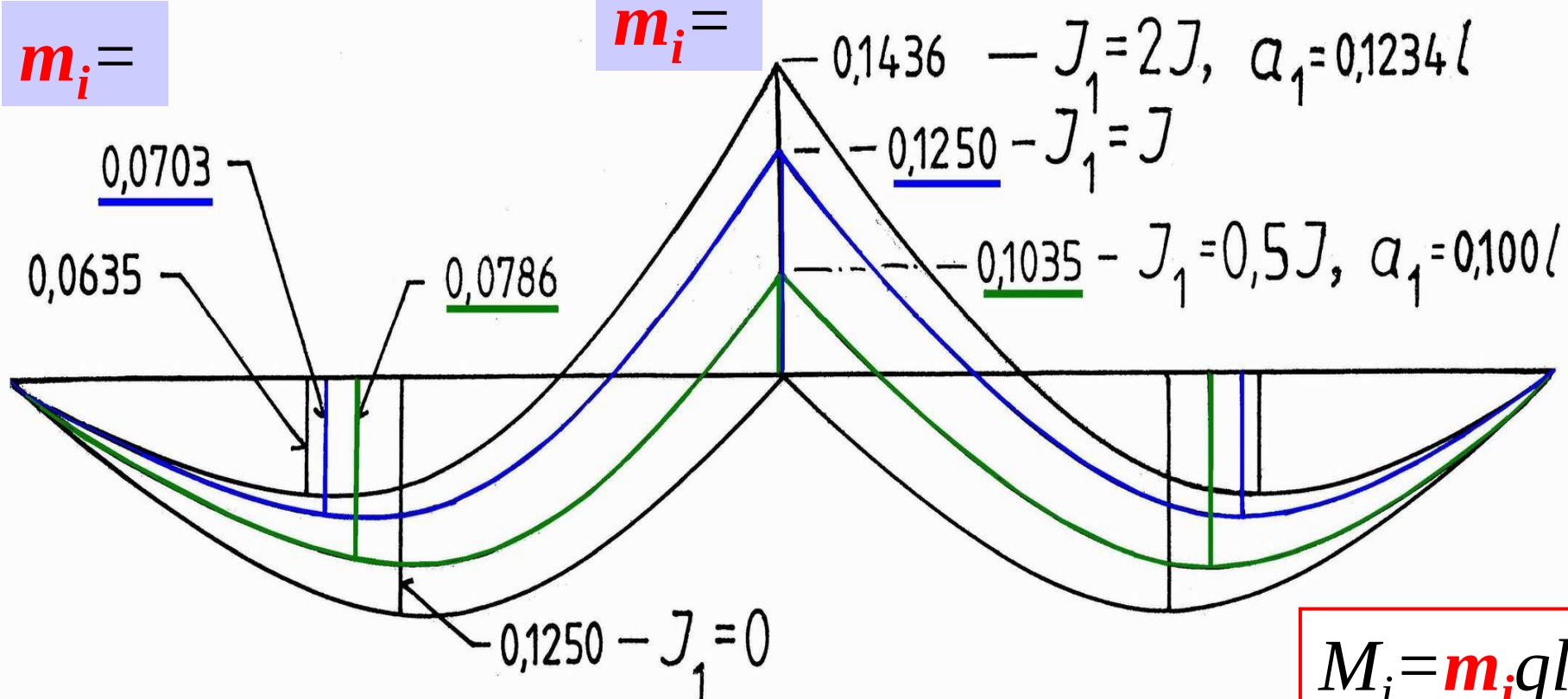
Połączenie uciągające płatwi



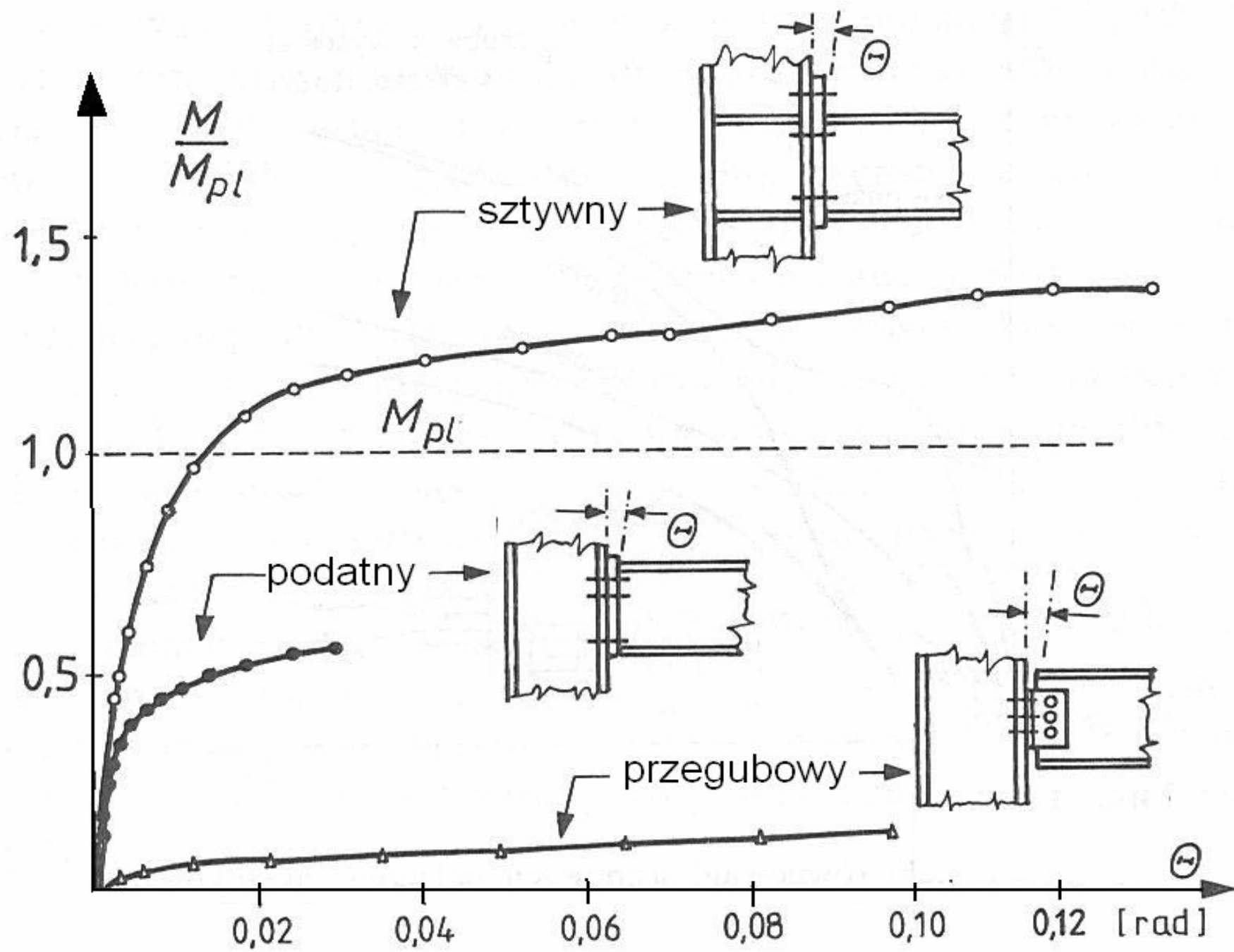


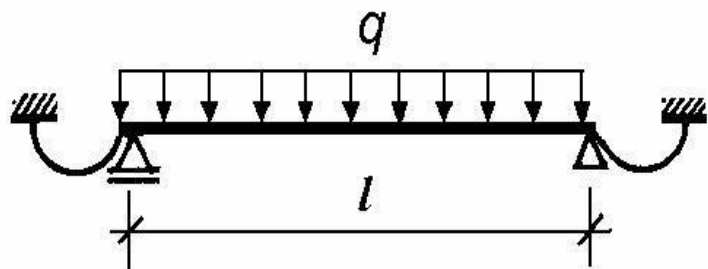
$$m_i =$$

$$m_i =$$

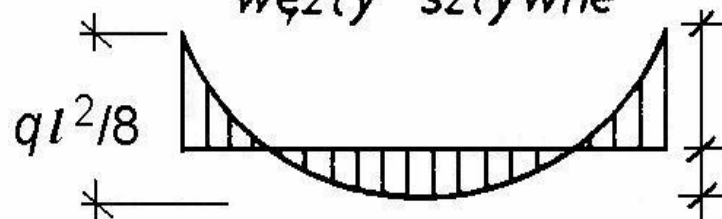
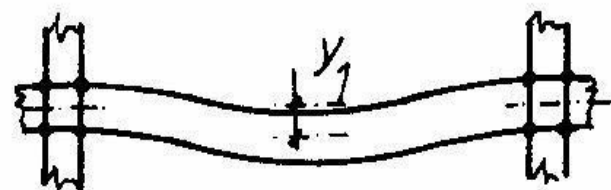


$$M_i = m_i q l^2$$





M



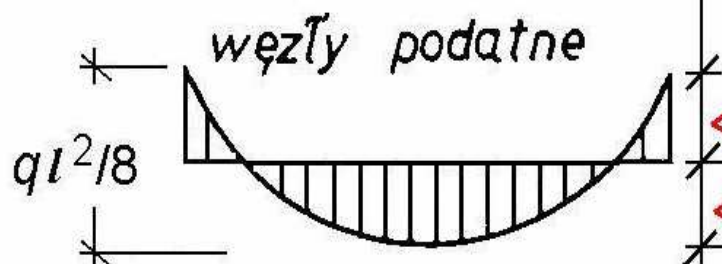
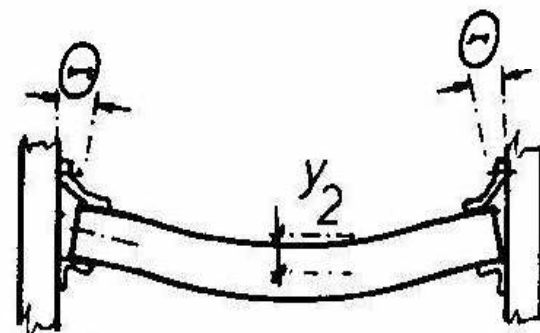
M_i

y_i

$$ql^2/12$$

$$ql^2/24$$

$$y_1 = \frac{ql^4}{384EJ}$$

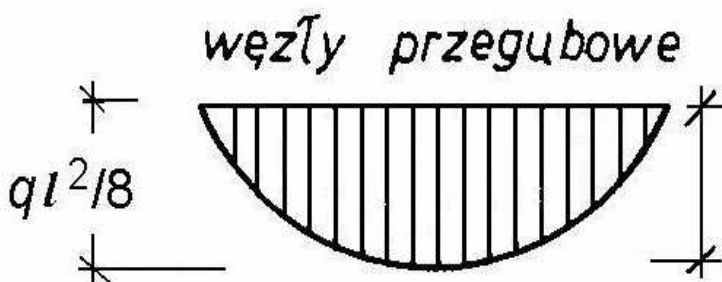
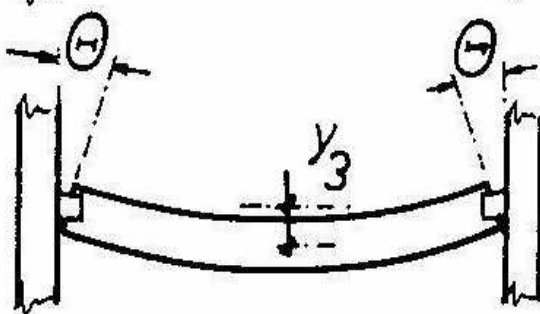


wężły podatne

$$< ql^2/12$$

$$< ql^2/8$$

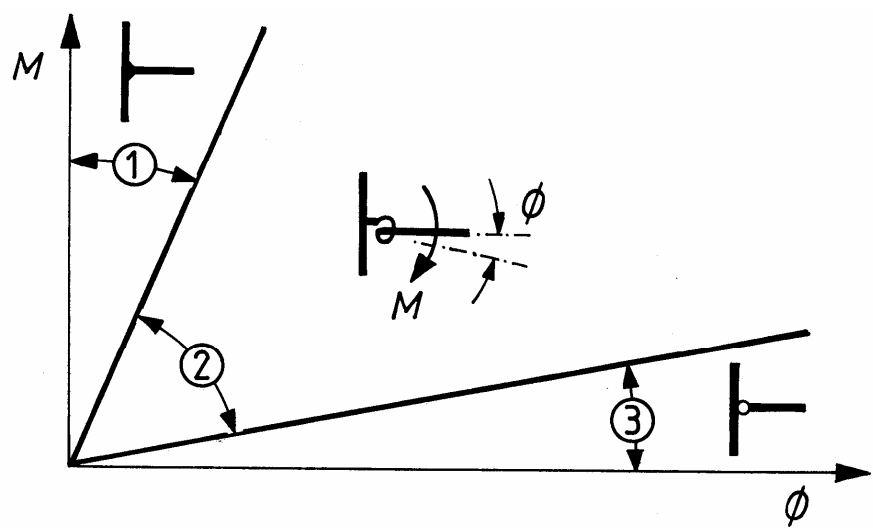
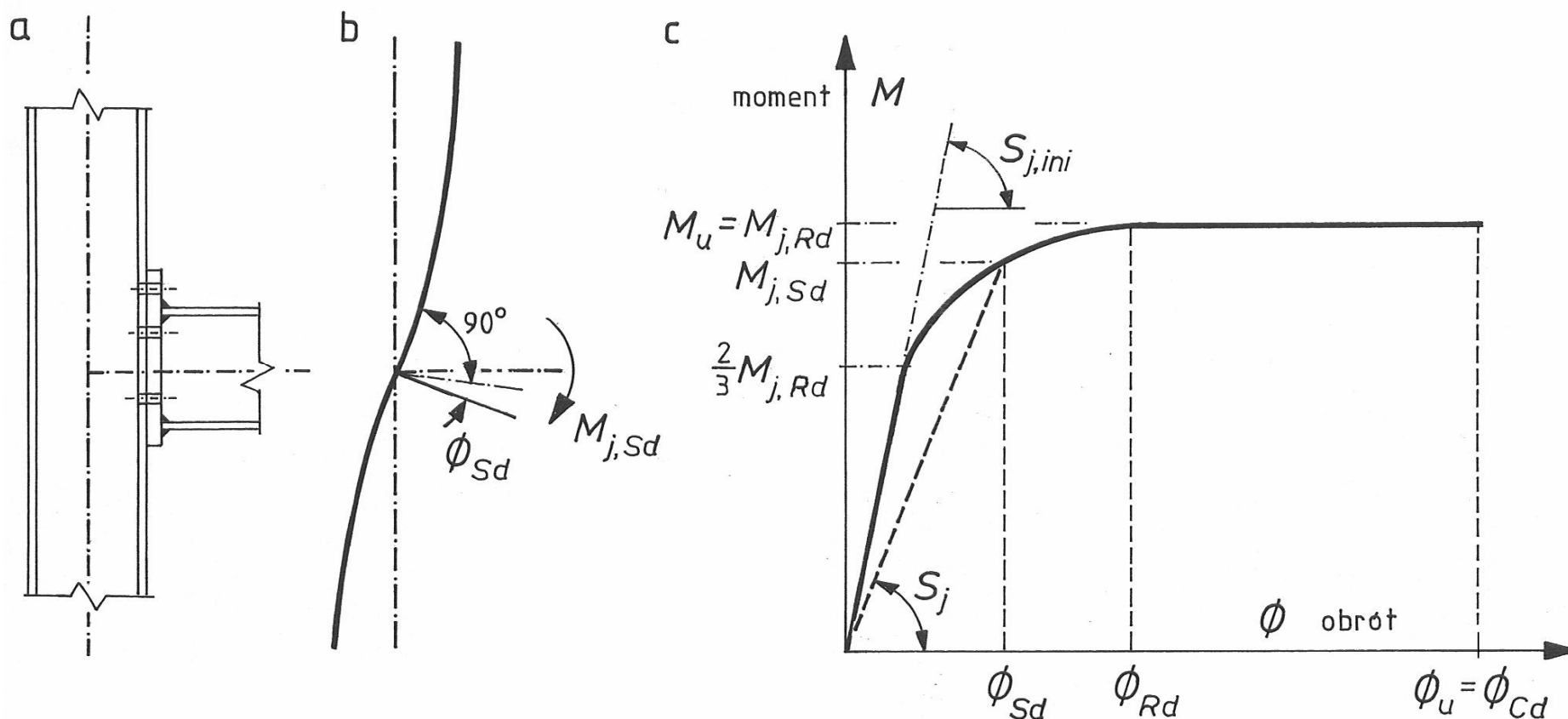
$$y_1 < y_2 < y_3$$



wężły przegubowe

$$ql^2/8$$

$$y_3 = \frac{5ql^4}{384EJ}$$



W analizie układów niepełno-
ciągłych węzły podatne modeluje
się jako połączenia o skończonej
sztywności (podatności).

Obliczanie i projektowanie takich
węzłów podano w EN-1993-1-8

ANALIZA GLOBALNA

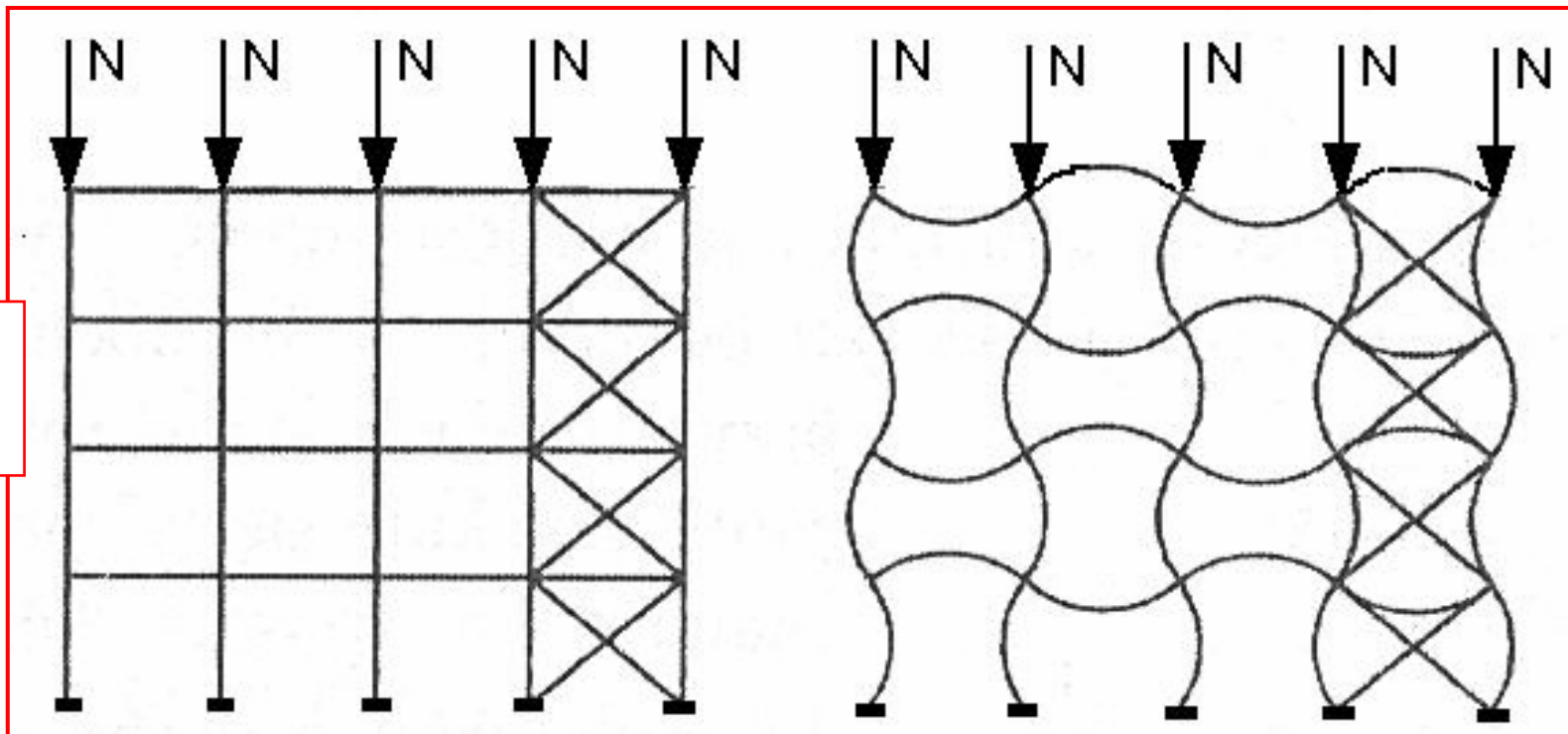
Do wyznaczania sił wewnętrznych i momentów w ustroju nośnym stosuje się najczęściej

- **analizę I rzędu**, przy założeniu pierwotnej geometrii,
- **analiza II rzędu**, z uwzględnieniem wpływu deformacji na statykę układu.

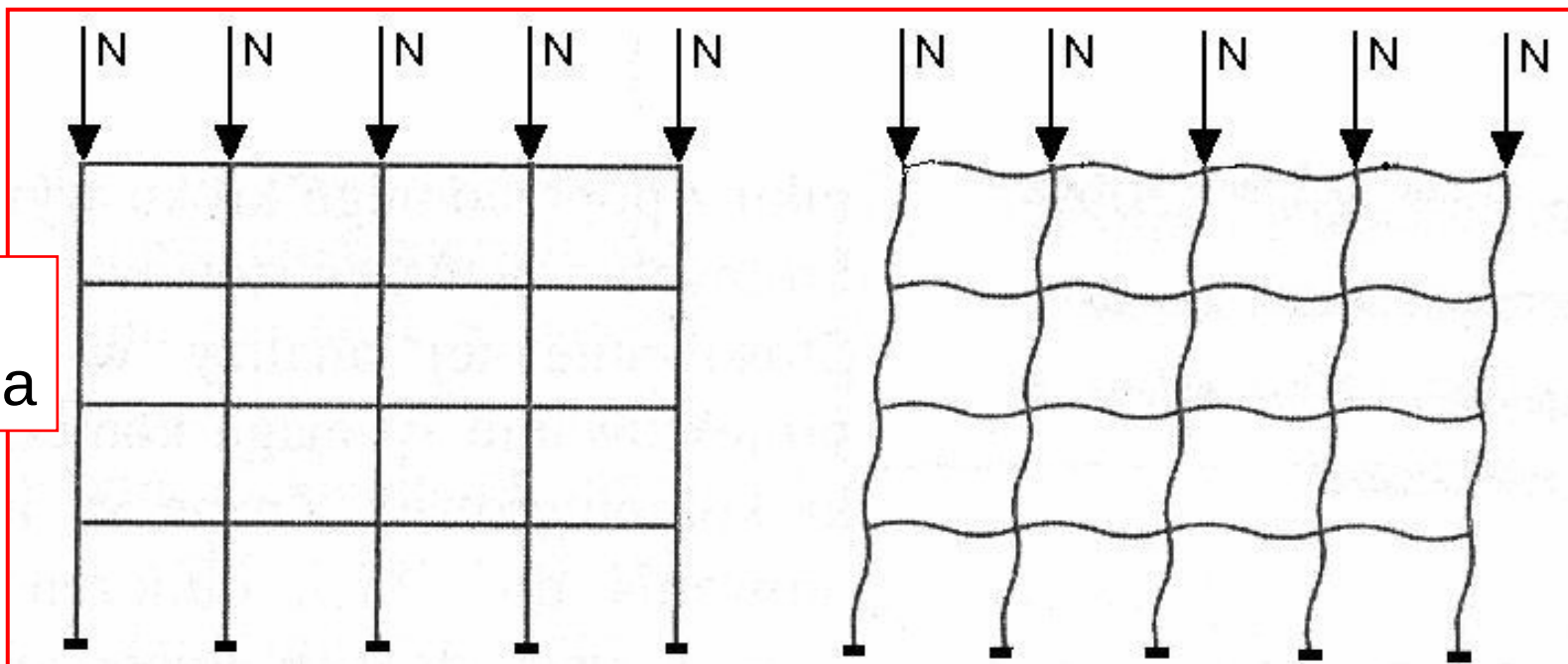
Efekty towarzyszące deformacjom ustroju (efekty II rzędu) powinny być uwzględniane, jeśli powodują znaczący przyrost efektów oddziaływań, lub wpływają istotnie na zachowanie się konstrukcji.

◆ Według załącznika krajowego w PN-EN 1993-1-1 analizę I rzędu bez uwzględnienia imperfekcji można stosować w przypadku układów nieprzechyłowych (sztywno stężonych), a także ram jednokondygnacyjnych układów przechyłowych.

Rama
stężona



Rama
niestężona



ANALIZA STATECZNOŚCI

W ocenie stateczności konstrukcji należy uwzględnić wpływy imperfekcji, niekiedy dodatkowe efekty II rzędu (efekty P-delta). W zależności od opcji obliczeniowej wpływ imperfekcji uwzględnia się w dwojaki sposób

- za pomocą odpowiednich współczyn. niestateczności,
- na etapie analizy układu, poprzez wprowadzenie zastępczych obliczeniowych imperfekcji geometrycznych.

Zastępcze obliczeniowe imperfekcje geometryczne w analizie ustrojów prętowych

Rozróżnia się:

imperfekcje globalne - wstępny przechył układu (Φ_0),

imperfekcje lokalne - wstępne wygięcia elementów (e_0/L)

ANALIZA UKŁADU A KRYTERIA NOŚNOŚCI*

W tym kontekście możliwe są 3 modele obliczeniowe i sposoby podejścia

1. Układ bez imperfekcji

- statyka I rzędu → kryteria A i B

2. Układ z imperfekcjami globalnymi

- statyka I rzędu + efekty P-delta → kryteria A i B ($L_{cr} \leq L$)

3. Układ z imperfekcjami globalnymi i lokalnymi

- statyka II rzędu → kryteria A

* **A** - nośność przekrojów, **B** - stateczność elementów

W przypadku opcji 3. Nie ma potrzeby sprawdzania stateczności elementów konstrukcji.

O zastosowaniu poszczególnych opcji decyduje parametr, w postaci mnożnika obciążenia krytycznego

$$\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed}$$

F_{cr} – obciążenie krytyczne przy globalnej niestateczności sprężystej,

F_{Ed} – sumaryczne obciążenie pionowe.

Opcję 1. stosuje się do układów nieprzechyłowych (gdy $\alpha_{cr} \geq 10$).

W przypadku układów przechyłowych ($\alpha_{cr} < 10$) tj. wrażliwych na przechyłowe efekty II rzędu, zasadniczo stosuje się opcję 3.

Opcję 2. - podejście uproszczone, stosuje się do układów regularnych i niezbyt smukłych ($10 > \alpha_{cr} \geq 3$).

Mnożnik obciążenia krytycznego (niestateczność sprężysta)

Ogólnie: $\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed}$; $\alpha_{cr} \cong (H_{ed} / V_{Ed}) h / \delta)^*$

$\alpha_{cr} \geq 10$	$10 > \alpha_{cr} \geq 3$	$3 > \alpha_{cr}$
Analiza I rzędu	Uproszczona analiza II rzędu	Dokładna analiza II rzędu
Układy nieprzechyłowe	Układy przechyłowe (wrażliwe na przechyłowe efekty II rzędu)	

* Formuła przybliżona dla układów regularnych

UPROSZCZONA ANALIZA II RZĘDU (założenia)

- Momenty II rzędu

$$M^{II} (H, F) \cong (H^*) + M (F)$$

H - obciążenia poziome

F - obciążenia pionowe

- Amplifikowane oddziaływania poziome*

$$H^* = H / (1 - \alpha_s); \quad H = H_o + H_w$$

H_o - siły od imperfekcji

H_w - siły od wiatru (lub inne)

- Wskaźnik wrażliwości na przechył*

$$\alpha_s = 1 / \alpha_{cr} \cong V \Phi$$

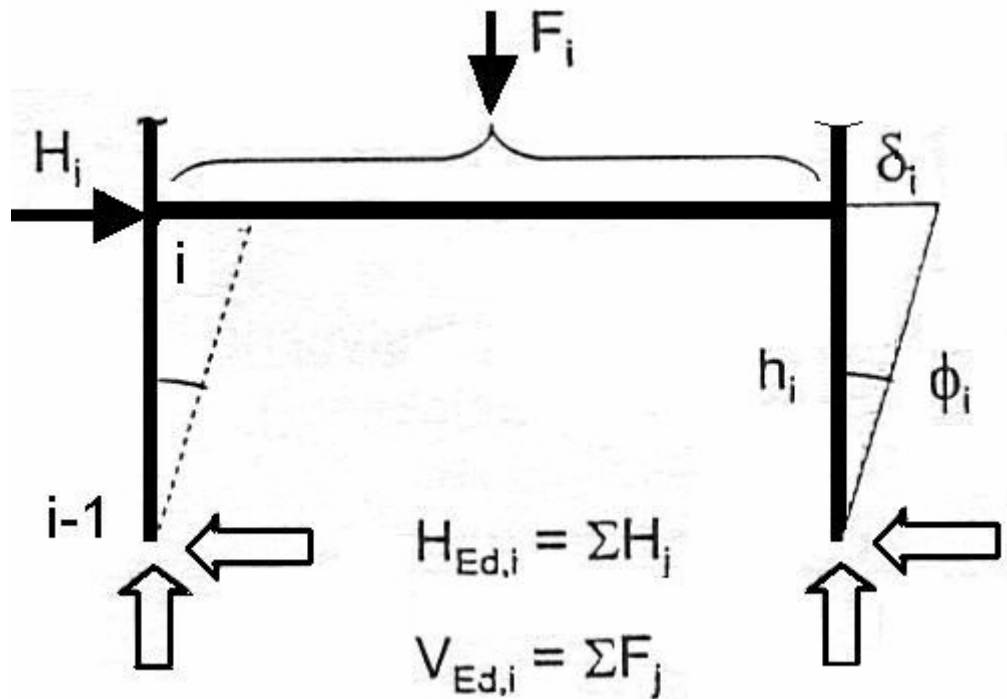
V - reakcja pionowa

Φ - podatność przechyłowa

* Dla poszczególnych kondygnacji

Parametry związane z przechyłem

Dane dla i-tej kondygnacji



Definicje

- Przechył kondygnacji

$$\phi_i = \delta_i / (H_j) / h_i$$

- Podatność przechyłowa

$$\phi_i = \phi_i / H_{Ed,i}$$

- Wskaźnik wrażliwości

$$\alpha_{si} = V_{Ed,i} \Phi_i$$

($\sum$ - sumowanie obejmuje siły dla $j \geq i$)

IMPERFEKCJE

Analiza konstrukcji powinna uwzględniać wpływy imperfekcji obejmujących naprężenia własne i odchyłki geometryczne takie jak

- **brak:** prostości, płaskości, prostopadłości, przylegania
- **mimośrodry montażowe** występujące w węzłach ustroju (z wyjątkiem uwzględnionych w kryterium nośności elem.)

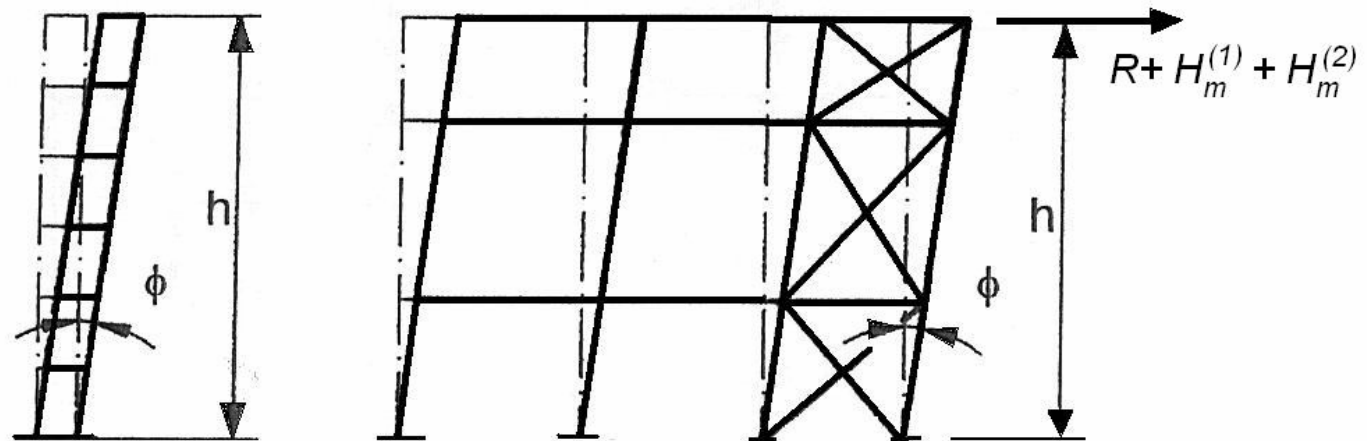
Imperfekcje w analizie globalnej ram

Przyjmowany w obliczeniach kształt globalnych i lokalnych imperfekcji określa się na podstawie analizy wszystkich możliwych postaci wyboczenia sprężystego ustroju (**w** oraz **z** płaszczyzny a także symetryczne i niesymetryczne). W ramach przechyłowych uwzględnia się w postaci:

- wstępnych imperfekcji przechyłowych oraz
- imperfekcji łukowych poszczególnych elementów.

WSTĘPNE IMPERFEKCJE PRZECHYŁOWE

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$$



gdzie:

ϕ_0 – wartość podstawowa $\phi_0 = 1 / 200$,

α_h – współczynnik redukcyjny ze względu na wysokość

$$\alpha_h = 2 h^{-0.5} \text{ lecz } 2/3 \leq \alpha_h \leq 1.0$$

α_m – współczynnik redukcyjny ze względu na liczbę słupów

$$\alpha_m = [0.5(1 + 1 / m)]^{0.5}$$

h – wysokość kondygnacji w metrach,

m – liczba słupów w rzędzie, które przenoszą $N_{Ed} < 0.5$ obciążenia słupa w analizowanej płaszczyźnie.

LOKALNE WSTĘPNE IMPERFEKCJE ŁUKOWE

Lokalne wstępne łukowe elementów narażonych na wyboczenie gięte - wartość względna

$$e_0 / L$$

gdzie L – długość elementu

Wartości obliczeniowe wstępnych imperfekcji łukowych e_0 / L

Krzywa wyboczenia wg tablicy 6.1	Analiza sprężysta	Analiza plastyczna
	e_0 / L	e_0 / L
a_0	1 / 350	1 / 300
a	1 / 300	1 / 250
b	1 / 250	1 / 200
c	1 / 200	1 / 150
d	1 / 150	1 / 100

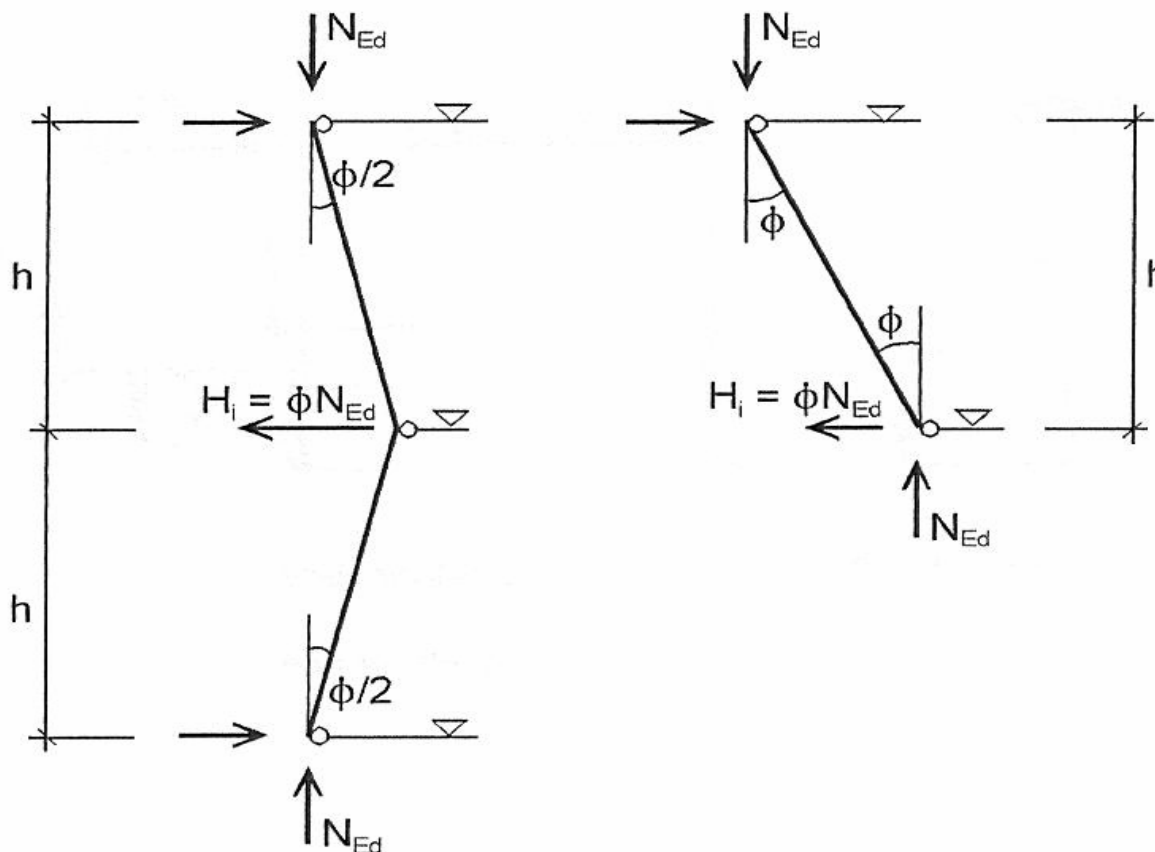
Można pominąć imperfekcje przechyłowe gdy przenoszą

$$H_{ed} \geq 0.15 V_{Ed}$$

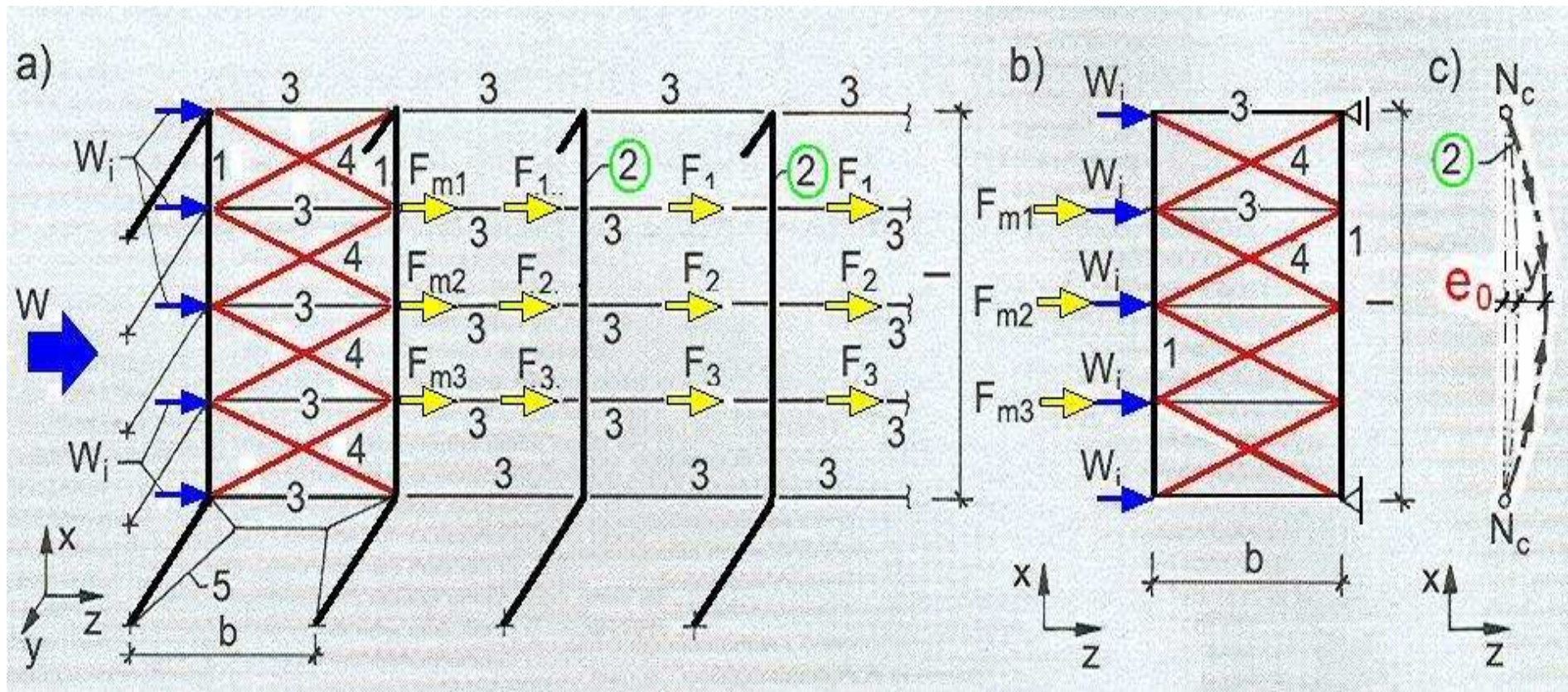
W celu wyznaczenia oddziaływań poziomych na tarcze stropowe zaleca się przyjmować imperfekcje o konfiguracji jak na rysunku, gdzie imperfekcją przechyłową uzyskana ze wzoru

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

dla h – wysokość kondygnacji



STĘŻENIA POŁACIOWE POPRZECZNE



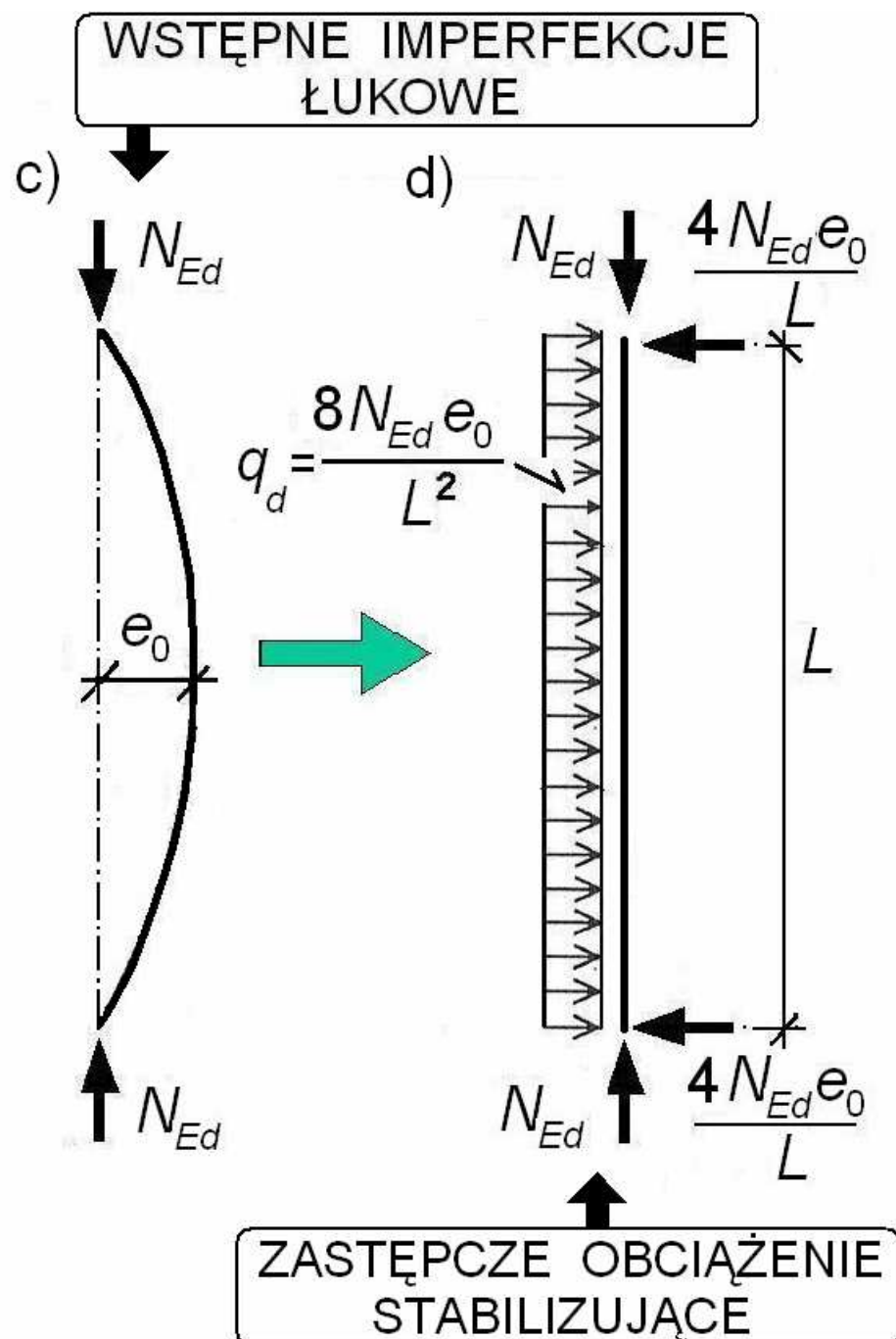
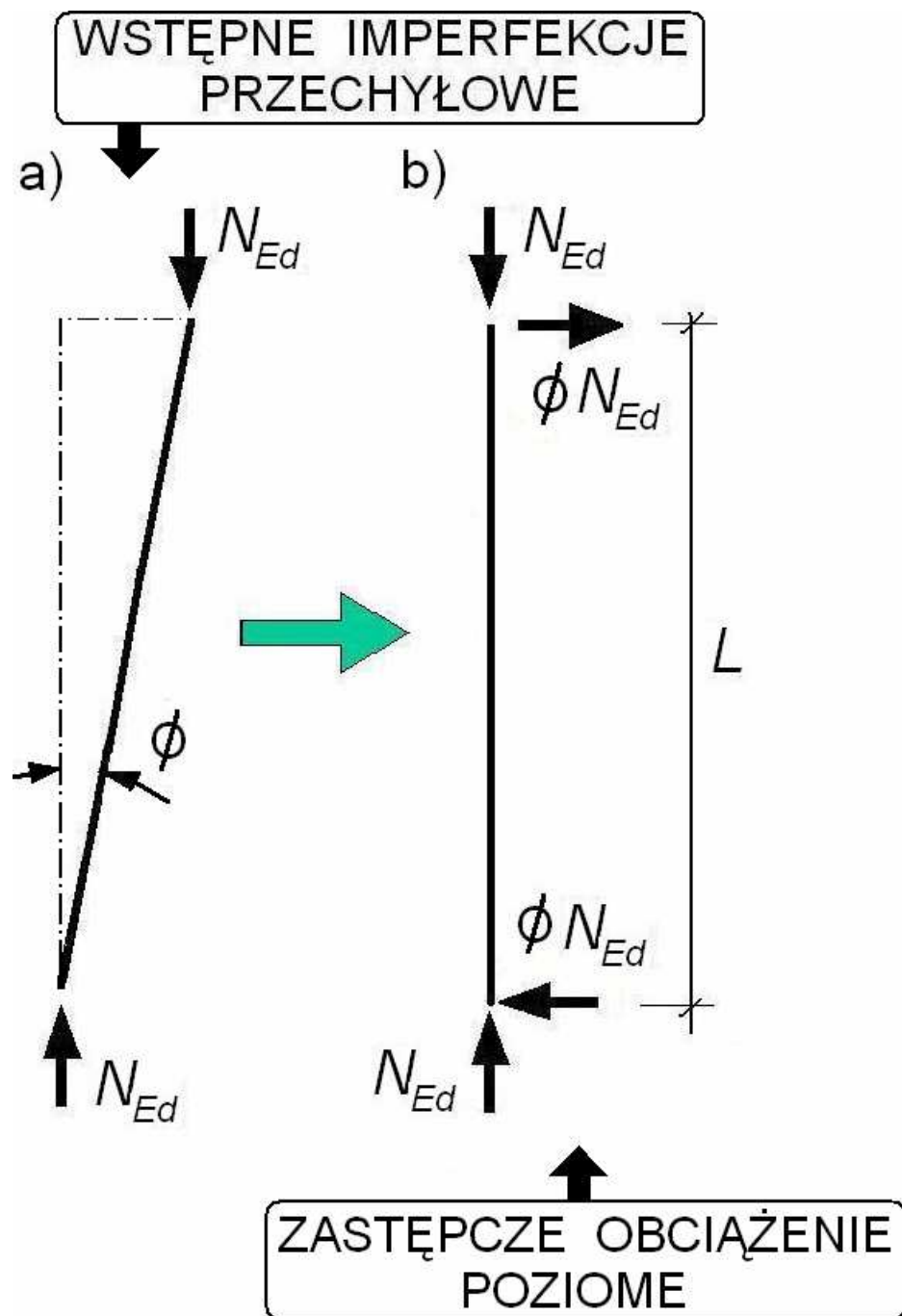
$\alpha_{m,PN}$

$$F_m = \frac{2}{1 + \sqrt{m}} \sum_{i=1}^m F_{0i}$$

$$F_0 = \max(0.01N_c, 0.005A_c f_d)$$

$$e_0 = \alpha_{m,EC} L / 500,$$

$$\alpha_{m,EC} = [0.5(1 + 1/m)]^{0.5}$$



Łukowe wygięcia elementów można zastąpić równoważną siłą stabilizującą

$$e_0 = \alpha_{m,EC} L / 500,$$

$$\alpha_{m,EC} = [0.5(1 + 1/m)]^{0.5}$$

błąd w PN-EC 1993-1-1

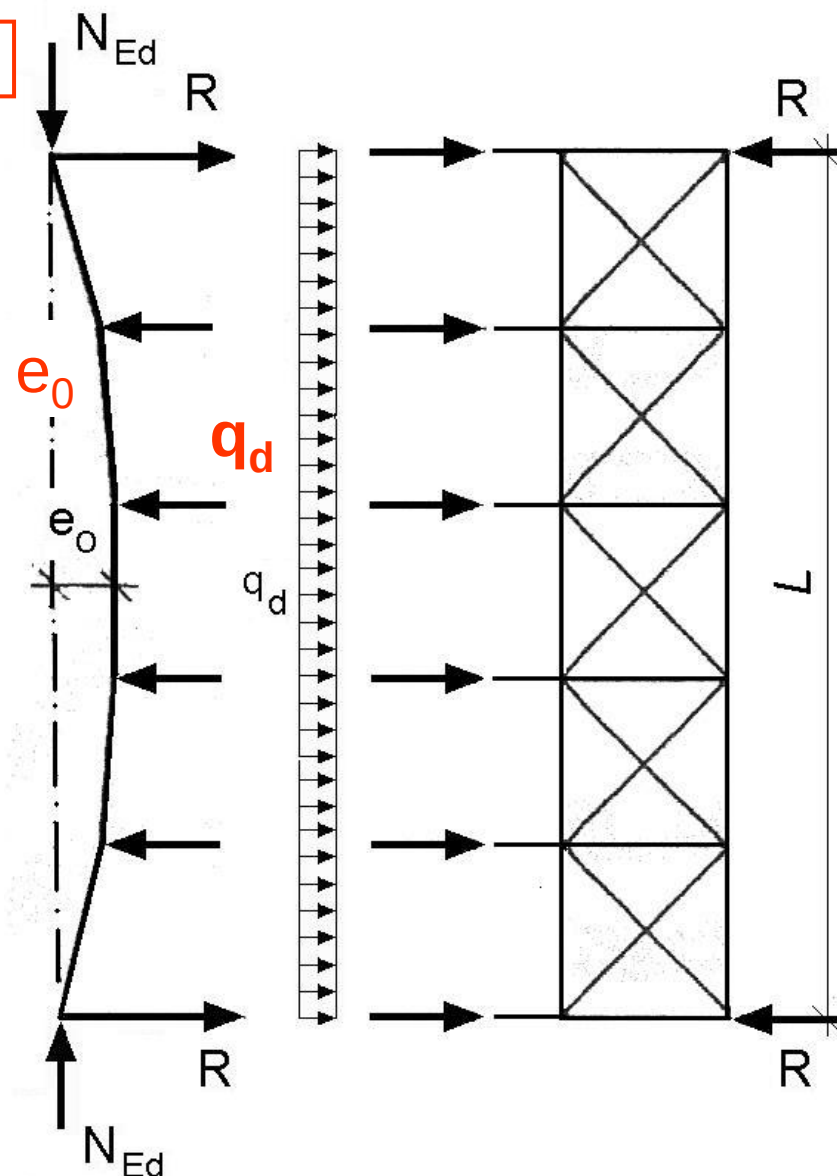
$$q_d = 8 \sum N_{ed} (e_0 + \delta_q) / L^2$$

δ_q – ugięcia stężenia od oddziaływań q i wszystkich obciążeń zewnętrznych z analizy I rzędu ($\delta_q = 0$, gdy obl. wg teorii II rzędu).

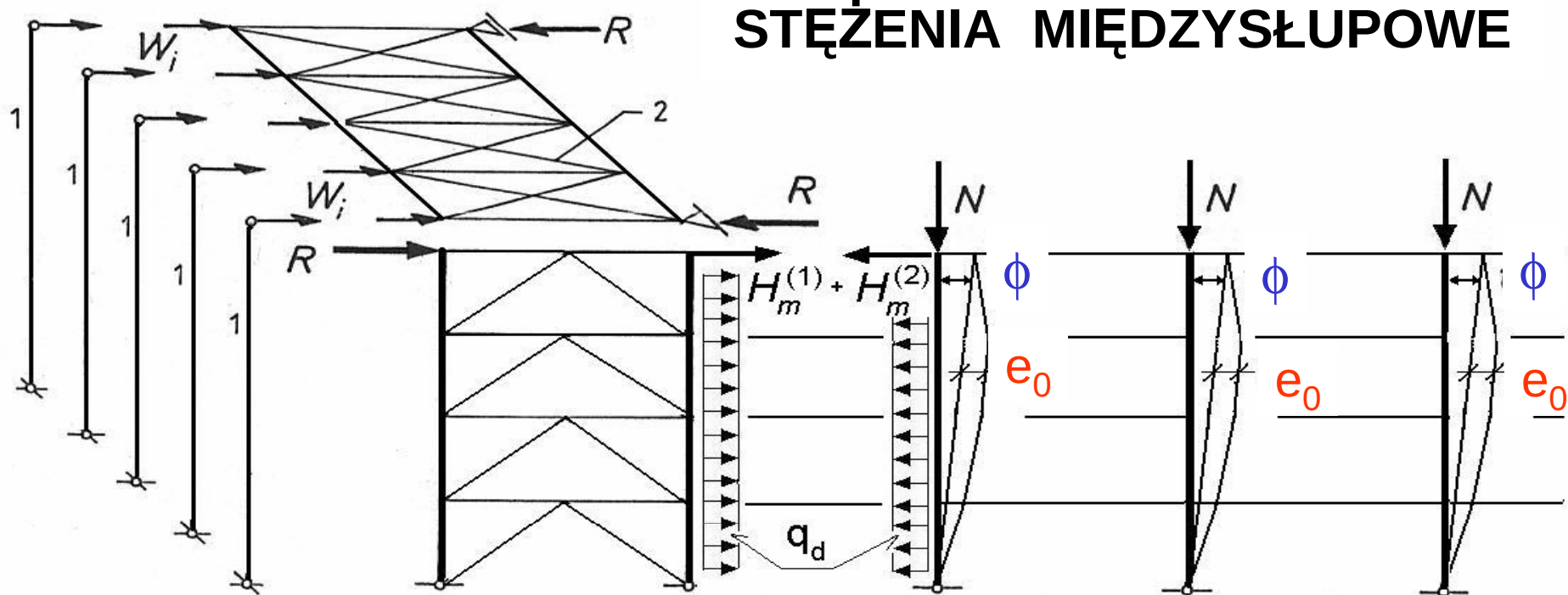
Gdy stężenie stabilizuje ściskany pas belki o stałej wysokości h , to siłę N_{Ed} można obliczyć ze wzoru

$$N_{Ed} = M_{Ed} / h$$

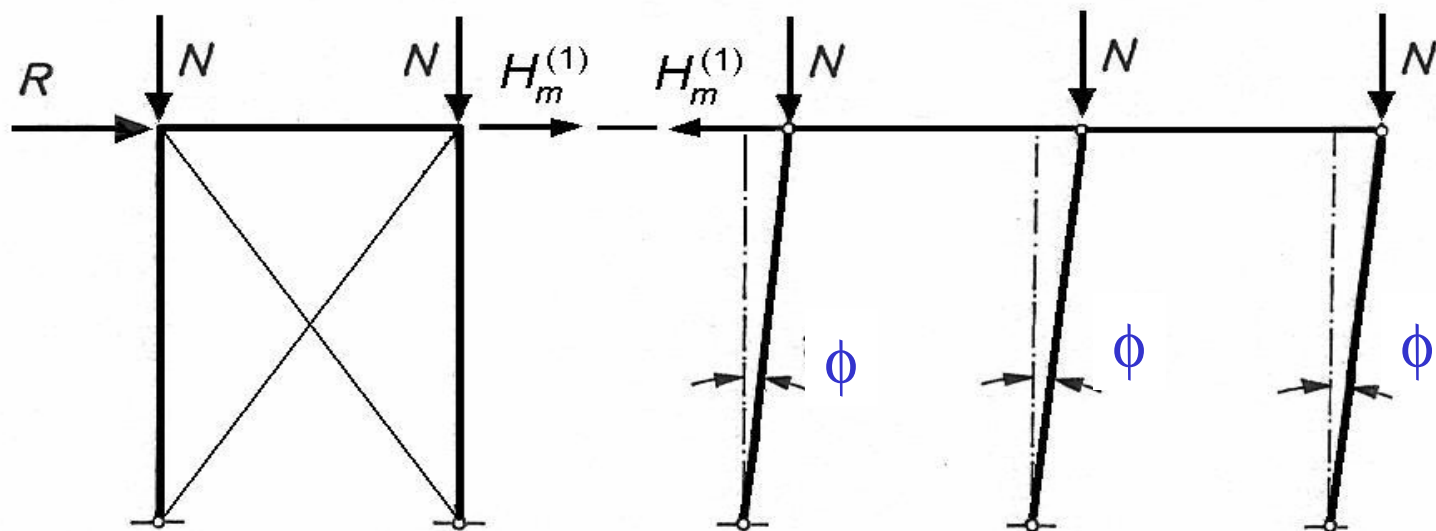
M_{Ed} – maksymalny moment zginający w belce.



a)

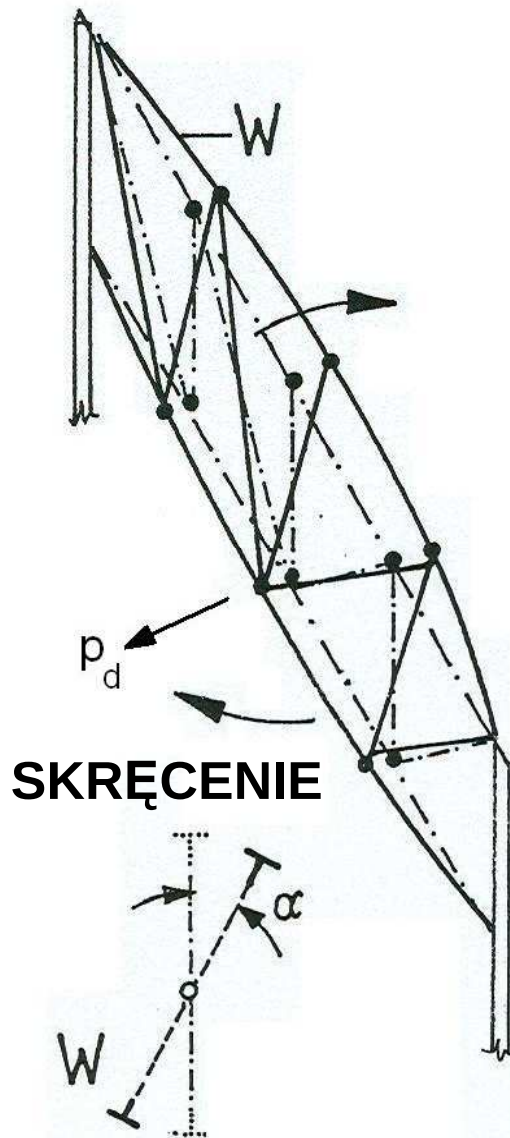


b)



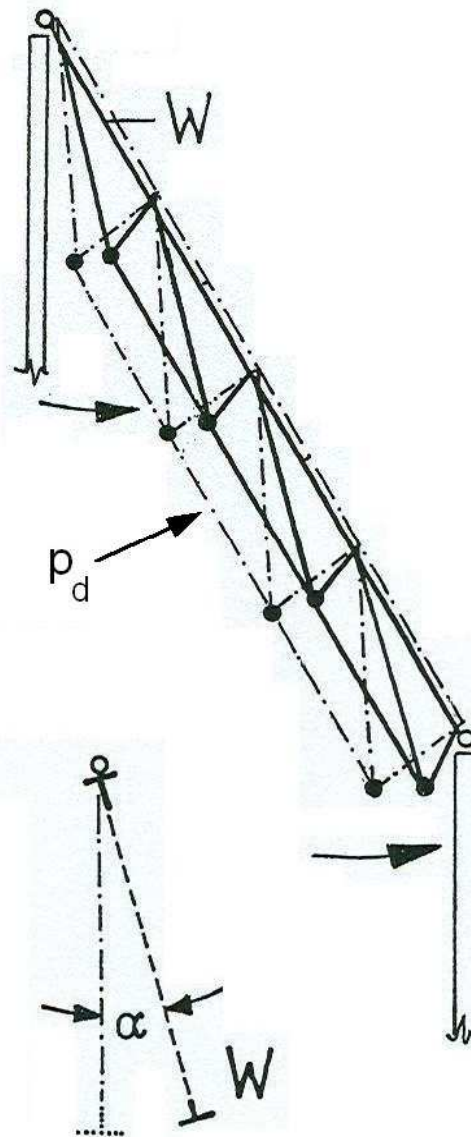
STĘŻENIA MIĘDZYWIĄZAROWE

a)



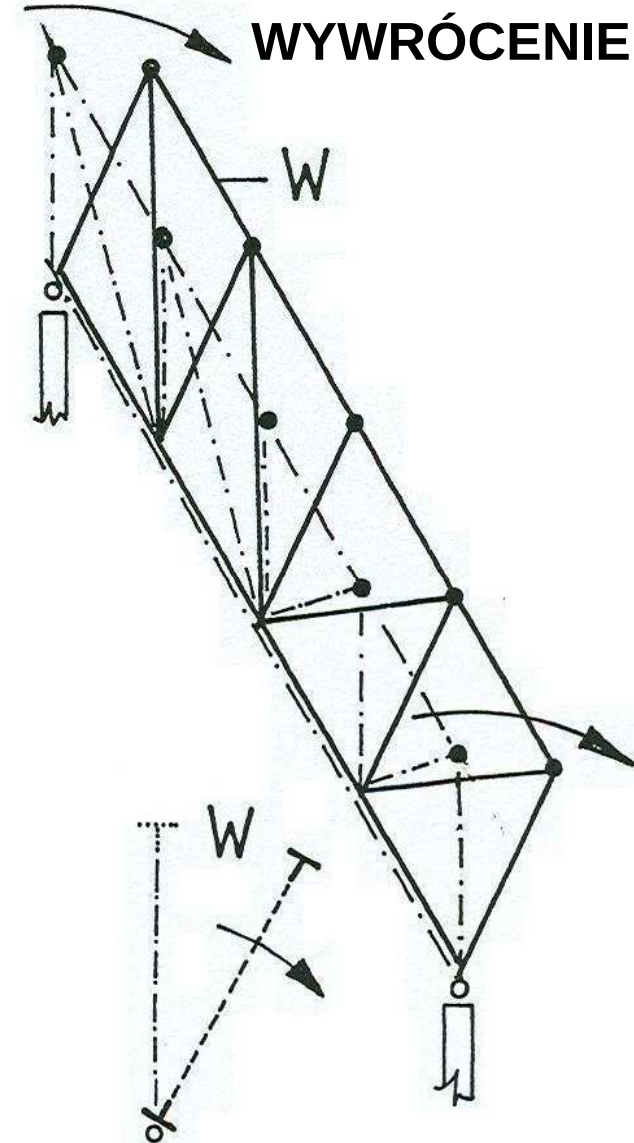
b)

POCHYLENIE

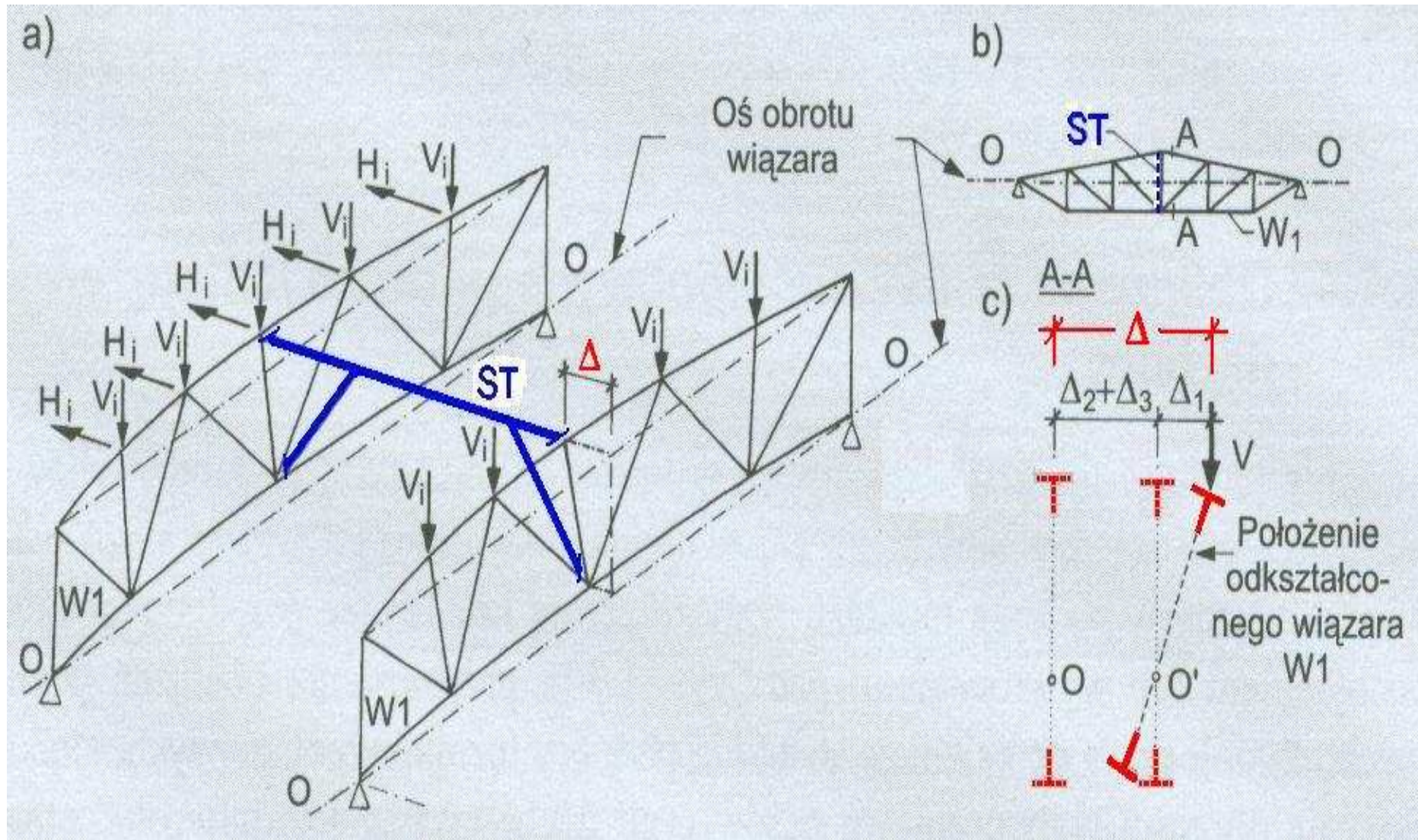


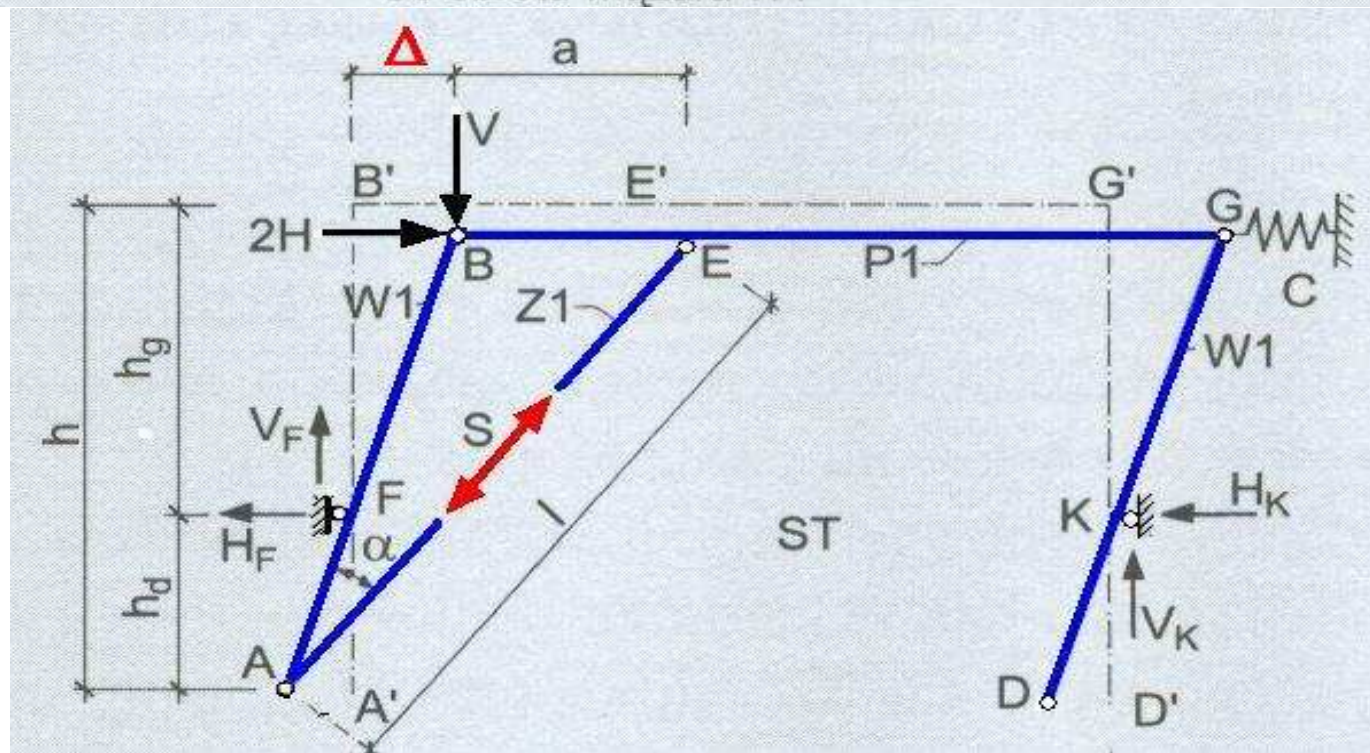
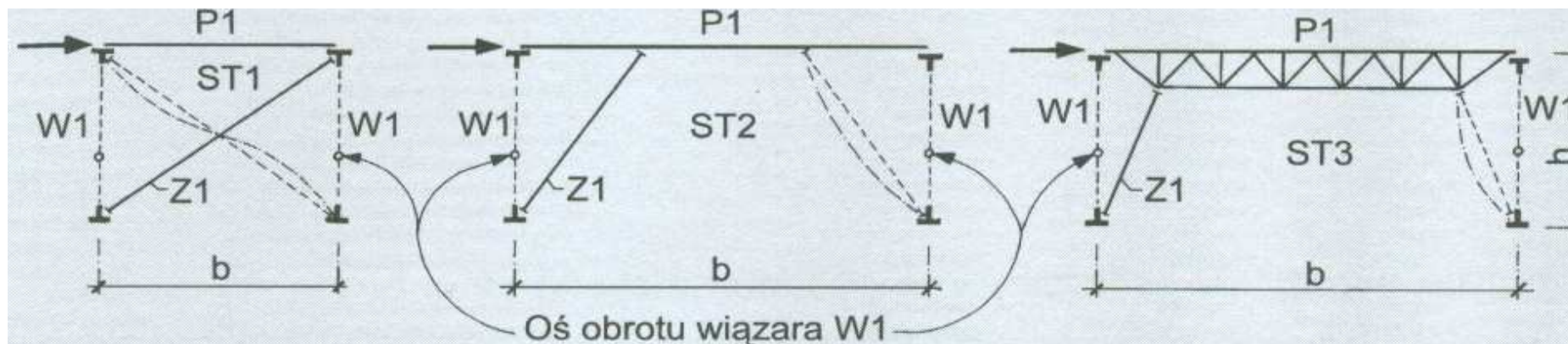
c)

WYWRÓCENIE



STĘŻENIA MIĘDZYWIĄZAROWE





Konferencja „**AWARIE BUDOWLANE**” 1991 r.

Biegus A., Cabaj J. Oszacowanie wyężenia pionowych stężeń dźwi-
garów kratowych, Inż. i Bud. nr 2/1991.

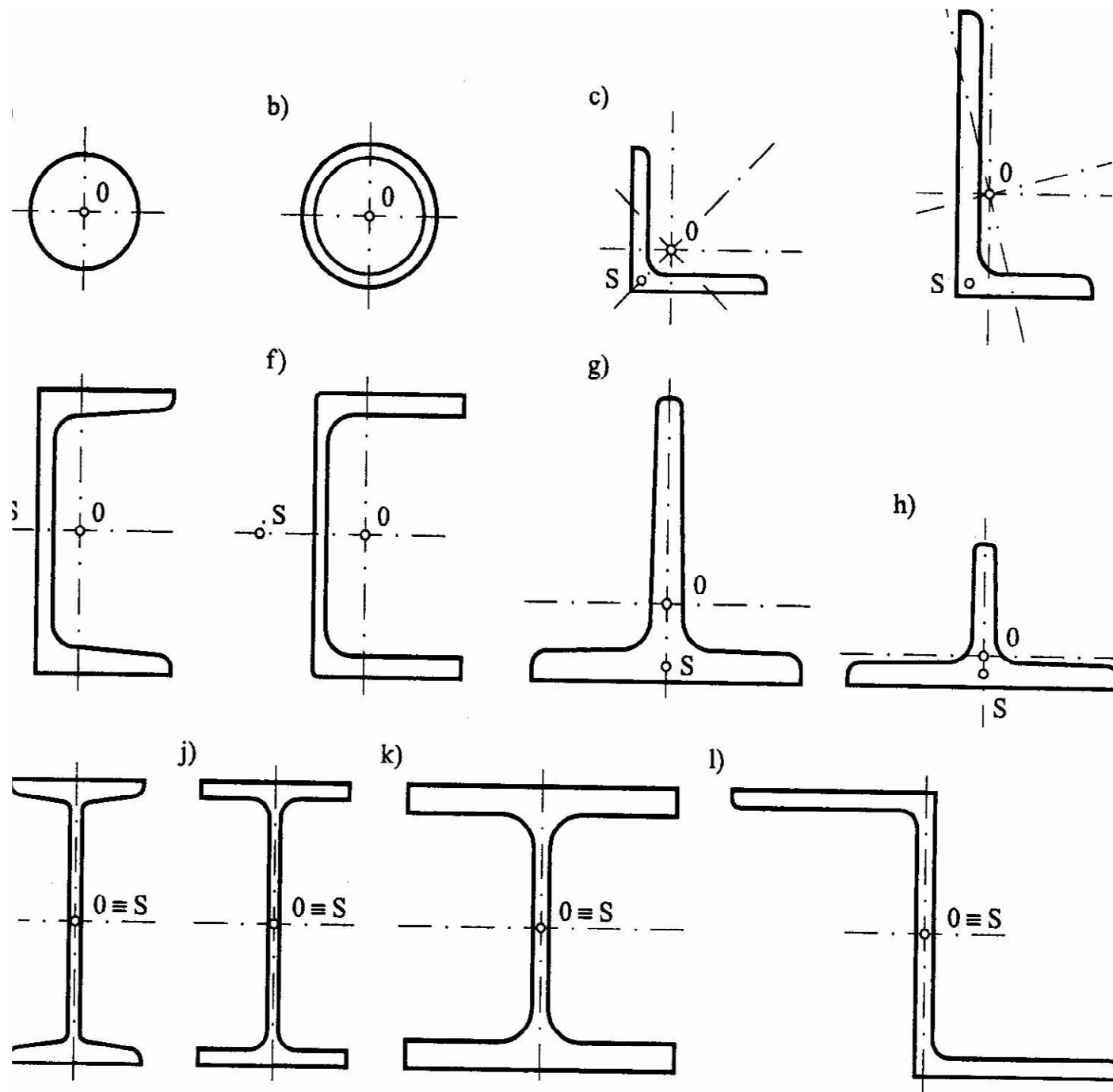
KLASYFIKACJA PRZEKROJÓW PRĘTÓW

Proporcje geometryczne części składowych przekrojów poprzecznych (pólek i środków) elementów zginanych i ściskanych sprawiają, iż w granicznych stanach wyężenia ich ścieżki równowagi statycznej (np. zależność obciążenie - przemieszczenie) mogą się zasadniczo różnić. Podstawowe typy przekrojów to: **grubościenne i cienkościenne**.

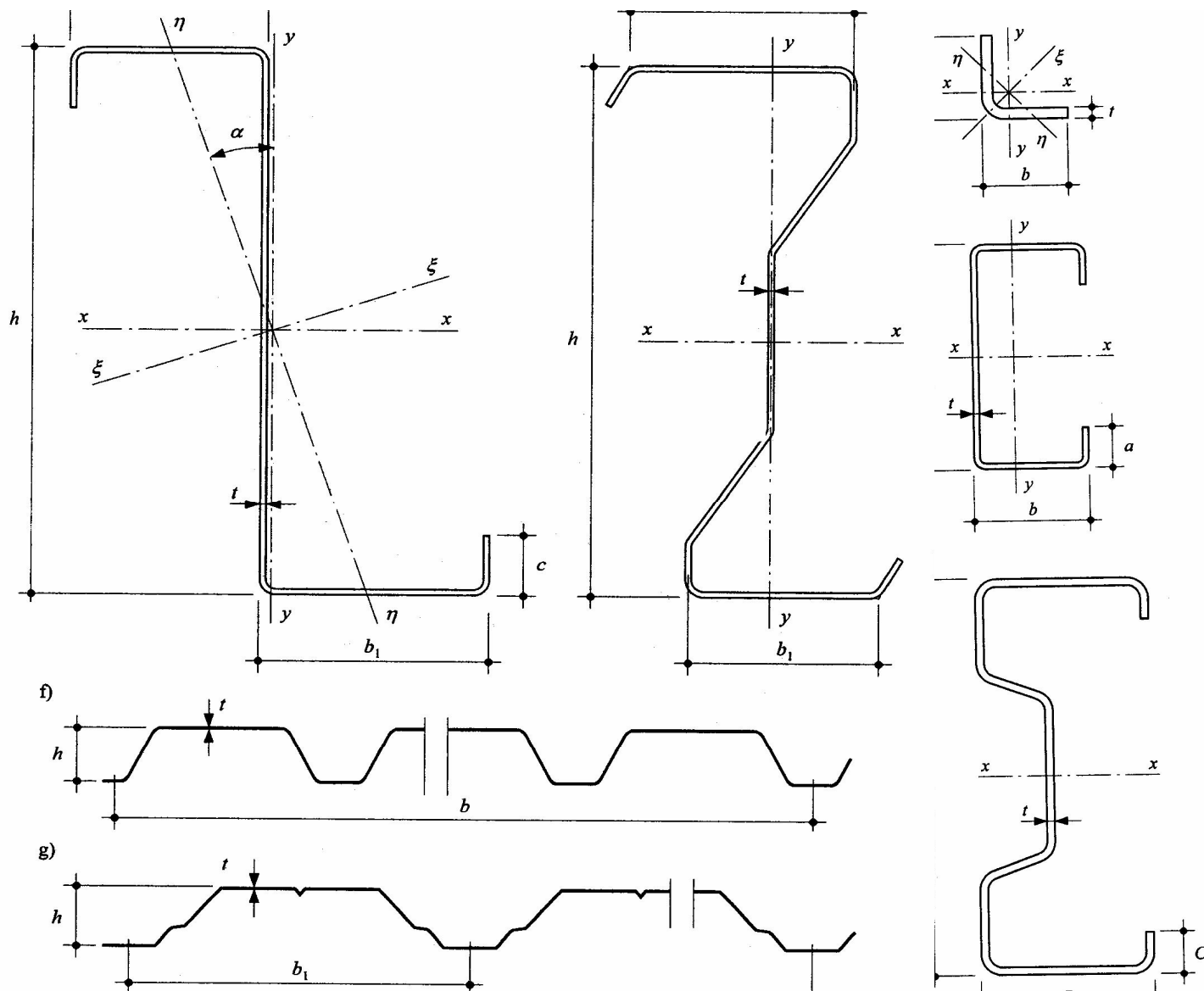
W zależności od smukłości ścianek, przekroje osiągać częściowe lub pełne uplastycznienie w granicznym stanie wyężenia.

Klasyfikacji przekroi została usystematyzowana w normach.

Przekroje
grubościenne
to kształtowniki,
w których
nie występuje
lokalna utrata
stateczności
(nie wpływa na
wyczerpanie
nośności).



Przekroje cienkościenne to elementy konstrukcyjne, w których występująca lokalna utrata stateczności części składowych kształtownika zmniejsza ich nośność sprężystą.



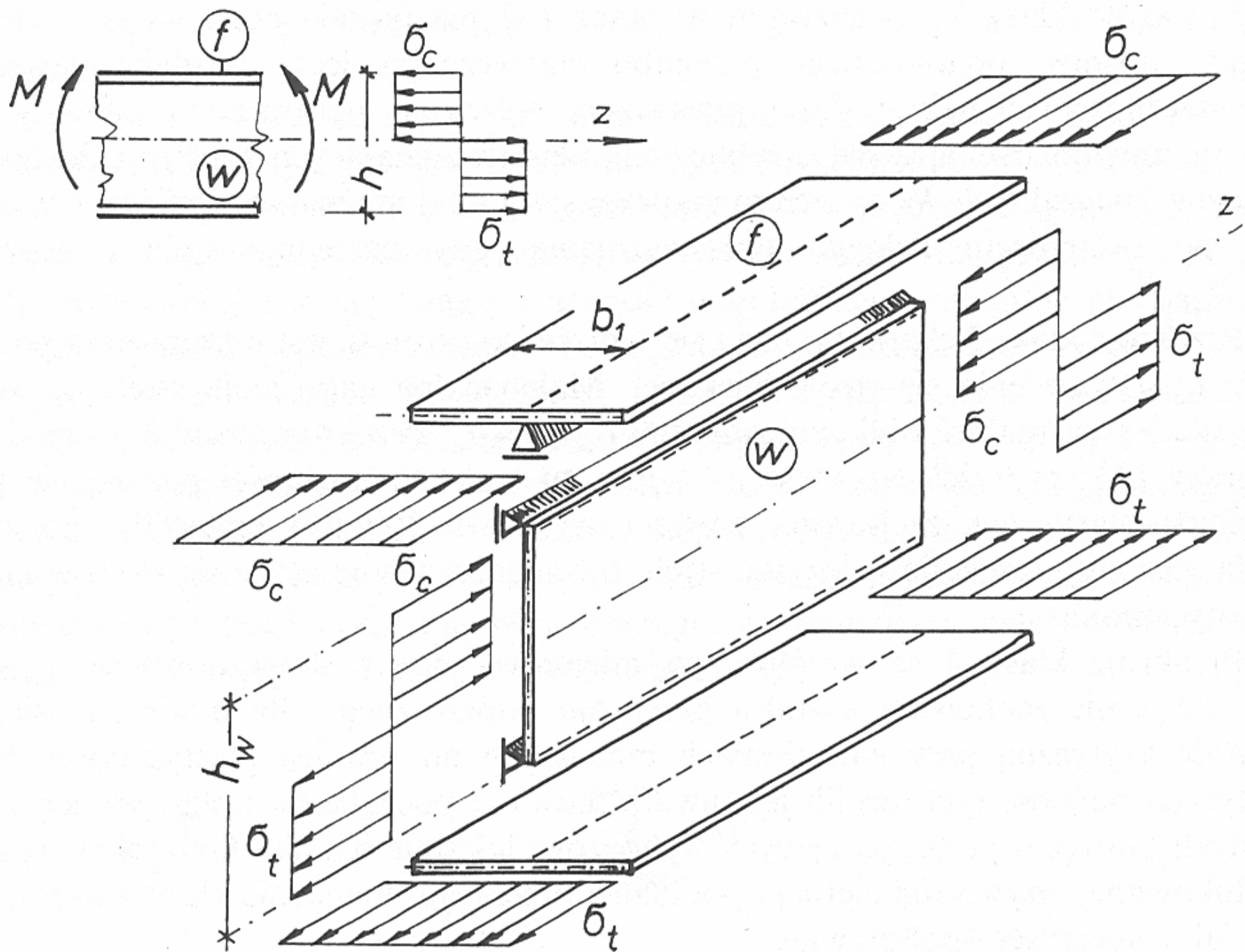
Podstawowym kryterium zaliczania przekroju (klasyfikacji) do poszczególnych klas jest smukłość ścianki elementów składowych (pólek, środków) kształtownika. Zarówno w EC 3 jak i PN-90/B-03200 kształtowniki podzielono na 4 klasy, przy czym:

- przekroje klasy 1, 2, 3 są zaliczane do grubościennych,
- przekroje klasy 4 zaś do cienkościennych.

Do wyznaczania nośności każdej z klas kształtowników (w związku z ich różną $\bar{S}_R$), stosuje się inne procedury obliczeniowe.

Podział na 4 klasy pozwala na dostosowanie (uzgodnienie) modeli fizycznych ustroju do ich modeli obliczeniowych

Aby pręty można było obliczać zgodnie z zasadami przyjętymi w mechanice konstrukcji narzuca się ich przekrojom takie wymogi wymiarowe, aby analizę ich wytrzymałości i można prowadzić w stanie plastycznym, sprężystym bądź nadkrytycznym. Służą do tego warunki zapewnienia zdolności przekroju prętów do obrotu. Wprowadzenie klas przekrojów umożliwia ściśle powiązanie modeli fizycznych z metodami obliczania ustroju.



KLASYFIKACJA PRZEKROJÓW* - KRYTERIA NOSNOŚCI

- Klasa 1: **Nośność plastyczna** (pełne uplastycznienie)
- Klasa 2: **Nośność plastyczna** (przegub plastyczny o ograniczonej zdolności do obrotu)
- Klasa 3: **Nośność sprężysta lub sprężysto-plastyczna** (początek uplastycznienia strefy ściskanej)
- Klasa 4: **Nośność „efektywna” lub wyboczeniowa** (niestateczność miejscowa)

* Graniczne smukłości ścianek dla poszczególnych klas są uzależnione od rodzaju ścianki (sposobu podparcia), rozkładu naprężeń i gatunki stali